

Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica  
e Energia



**O Potencial dos UAV para Atualização  
de Cartografia Municipal**

**Luís António de Oliveira Serra**

Dissertação

Mestrado em Engenharia Geográfica

**2014**

Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica  
e Energia



## **O Potencial dos UAV para Atualização de Cartografia Municipal**

**Luís António de Oliveira Serra**

Dissertação

Mestrado em Engenharia Geográfica

Orientadora: Professora Doutora Paula Redweik

**2014**

A meu pai, António

# O Potencial dos UAV para Atualização de Cartografia Municipal

Luís Serra

## Resumo

A grande maioria dos municípios portugueses possui cartografia à escala 1:10 000 para todo o seu território, excluindo as áreas urbanas, em que predomina a escala 1:2000. A cartografia das pequenas áreas é tradicionalmente atualizada com recurso a estações totais ou GPS de elevada precisão, enquanto que a cartografia de grandes áreas requer a utilização de meios aéreos pesados, clássicos. De entre as muitas tarefas de um município a atualização de cartografia não é, certamente, uma das suas principais tarefas e perante cortes orçamentais a resposta normal é adiá-la ou, numa lógica de economias de escala, esperar que um número suficiente de municípios vizinhos se associe. Neste contexto, a utilização de UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*) e especialmente a classe dos micro e mini-UAVs com menos de 5Kg de peso, constitui uma oportunidade excitante para desempenhar esta tarefa. As principais vantagens dos UAVs comparativamente aos meios aéreos clássicos pesados são: custos de operação mais reduzidos, maior rapidez de utilização, possibilidade de atuação com nuvens e grande facilidade de manuseamento.

A autoridade nacional de cartografia, a Direção Geral do Território (DGT), publicou normas de qualidade a que a cartografia produzida por instituições públicas deve obedecer. Neste contexto, a cartografia a ser produzida por UAVs não constitui exceção.

O objetivo do nosso estudo é avaliar a qualidade (especialmente a qualidade posicional) de uma solução comercial de UAVs, tendo em atenção as normas de qualidade impostas pela DGT. Tanto quanto é do nosso conhecimento, este é o primeiro estudo do género em Portugal.

A solução comercial de UAV adotada foi o modelo swinglet CAM da Sensefly. Analisámos e caracterizámos o aparelho, o plano e execução do voo, bem como os produtos que foram automaticamente gerados. Ficámos impressionados com a facilidade de planificação e realização do voo. Confirmámos a grande dependência do aparelho em relação às condições atmosféricas, especialmente o vento. Durante a realização do voo e por breves instantes, registámos uma perda de comunicação entre a estação de controlo e o aparelho, o que conduziu ao não registo de dados, incluindo a posição e orientação do aparelho. A seguir ao voo, realizou-se uma aerotriangu-



lação automática (ATA) pelo software de pós-processamento da Sensefly, durante o qual foram extraídos uma média de um ponto de ligação por metro quadrado, sendo este valor mais do que aquilo que seria de esperar comparativamente a um software clássico. Uma enorme quantidade de informação detalhada resultou deste pós-processamento, sendo de particular interesse a orientação interna da câmara fotográfica, a orientação externa (OE) das imagens, o modelo digital de superfície (MDS) e a ortofoto.

Para a orientação absoluta do bloco e para medir a respetiva qualidade posicional, um total de 161 pontos fotogramétricos (PFs) e pontos de controlo (PCs) foram medidos em dois dias e meio. Usou-se um GPS Leica 1200 em modo RTK e estático com recurso à rede RENEP, tendo-se obtido uma precisão de 1.8 cm (sigma 3D). Os pontos foram medidos maioritariamente ao nível do solo, mas também em terraços, coberturas planas e uma torre.

O aparelho está equipado com uma sistema de navegação inercial (INS) integrado com um recetor GPS. Enquanto que o GPS fornece a posição absoluta do sensor, o INS fornece a atitude. Deste modo, é possível determinar a OE por meio de georreferenciação direta. Como não encontramos unanimidade na definição deste conceito, definimos georreferenciação direta como o *processo independente de recuperação da geometria existente entre os objetos do mundo real (representado por um qualquer sistema de referência) e a imagem desses mesmos objetos (representados por um plano imagem) resultante da integração do sensor remoto e dos sistemas de navegação associados*. A georreferenciação direta foi realizada em software MatLab. Deste cálculo resultou um EMQ de 3.378 metros para a posição planimétrica absoluta do avião e um EMQ para a atitude de  $3.1685^\circ$  para *omega*,  $1.8127^\circ$  para *phi* e  $8.6723^\circ$  para *kappa*, confirmando a baixa exatidão do sistema GPS/INS.

O MDS tem diversas aplicações em fotogrametria, como por exemplo a produção de ortofotos reais e modelação 3D. Quisemos estabelecer qual o melhor método de interpolação determinístico para medir a sua exatidão altimétrica. Para este efeito, testámos cinco métodos de interpolação: Vizinho mais próximo, método linear, vizinhos naturais, IDW e melhor triângulo. Tradicionalmente os métodos de interpolação determinísticos geram primeiro a rede irregular de triângulos (TIN) e depois escolhem o triângulo que envolve o PC. Contudo, os métodos IDW e melhor triângulo que utilizámos, geram apenas e só o polígono que melhor envolve o PC em avaliação, tendo-se mostrado como os métodos mais eficientes. O método do melhor triângulo, com um EMQ de 0.6894 metros, mostrou ser o melhor método para este tipo de terreno, maioritariamente composto por uma densa zona urbana. De qualquer modo, este valor deve ser interpretado com cuidado porque foram proposi-

tadamente medidos PCs próximos de linhas de quebra. Verificámos também que o MDS não modelou corretamente alguns terraços e uma torre, provavelmente devido aos seguintes motivos: baixa altura de voo, elevada inclinação das fotos, poucas imagens sobrepostas e complexidade dos telhados e terraços.

Avaliámos também a qualidade posicional e temática da ortofoto real automaticamente produzida. O orto-mosaico *true-color* registou uma resolução espacial de 3.0 cm. Notámos também uma boa qualidade radiométrica em termos de balanceamento de cor. Aumentando a escala de visualização notámos um conjunto de situações temáticas menos favoráveis: ondulação de beirados e cumeeiras, efeito-fantasma e visualização indesejada de fachadas. O artefacto dominante foi a ocorrência de beirados e cumeeiras onduladas. Muitas destas situações indesejáveis atribuem-se ao facto de o MDS ser apenas constituído pela amostra primária de pontos cotados. A qualidade da ortofoto pode ser melhorada caso se aumente o número de imagens sobrepostas mas, a completa eliminação dos artefactos apenas deverá ser possível caso o MDS aceite a introdução de elementos vetoriais, como beirados e cumeeiras, por exemplo. A exatidão posicional da ortofoto foi testada com diferentes amostras de PFs: 5, 10, 20 e 33 PFs. Destes testes obtivemos os seguintes EMQs em planimetria: 0.21 metros para 5 PFs; 0.11 metros para 10 PFs; 0.09 metros para 20 PFs e 0.09 metros para 33 PFs. Como se pode verificar, a utilização de mais do que 20 PFs não conferiu nenhum benefício adicional. Por último, comprovámos que uma boa distribuição dos PFs é mais importante do que a sua quantidade.

A exatidão posicional foi testada num ambiente de fotogrametria interativa porque a restituição de cartografia se processa neste tipo de ambiente. As plataformas escolhidas foram as estações de trabalho *Photomod* da Racurs e a *ImageStation Automatic Triangulation* da Intergraph. Em ambas as plataformas usámos os resultados de pós-processamento do software da Sensefly. Usando diretamente os parâmetros de OE da Sensefly, não conseguimos formar quaisquer modelos estereoscópicos em ambiente Photomod. Para ultrapassar este problema realizou-se uma ATA em ambiente Photomod, com diferentes parâmetros de configuração. Na ATA realizada com os melhores parâmetros de configuração obtivemos um EMQ planimétrico de 1.158 metros e um EMQ altimétrico de 0.139 metros para os resíduos dos PFs, bem como um ajustamento global ( $\sigma_0$ ) de 1.424. O resultado planimétrico alcançado é superior à exatidão exigida pela DGT (EMQ  $\leq 0.3$  metros, para a escala 1:2000 de cartografia). Foi avaliada a exatidão posicional dos mesmos PCs em idênticos modelos estereoscópicos nas duas plataformas em estudo. A média observada dos resíduos em planimetria foi de 0.0436 metros para a Intergraph e de 1.3309 metros para o Photomod. A média observada dos resíduos em altimetria foi de 0.0587

metros para a Intergraph e de 0.0780 metros para o Photomod. A exatidão planimétrica observada nos modelos em Photomod, está para além daquilo que seria esperado. As imagens UAV diferem das imagens aéreas clássicas no respeitante à inclinação e percentagem de sobreposição e talvez esse facto explique que o software da Intergraph tenha rejeitado 10 das 38 imagens do bloco, aquando do respetivo processamento. Foram apenas utilizados dois PCs medidos em quatro modelos, para o trabalho de controlo posicional. Tal facto limita a realização de conclusões mais robustas. Apesar de tudo, os resultados alcançados em ambiente Intergraph merecem ser aprofundados.

Por último, foi realizado um questionário online a todos os produtores de cartografia registados na DGT. O objetivo do questionário foi avaliar o grau de conhecimento dos produtores e o estado de preparação do mercado quanto a esta tecnologia. O questionário foi enviado a 139 empresas. Apenas 17 respostas foram obtidas. Todas as empresas que responderam mostraram estar a par desta nova tecnologia. 41% das empresas já realizou testes com UAVs. Em 24% das empresas os UAVs fazem já parte do seu modelo de negócio. O produto UAV mais comercializado são as ortofotos. A falta de legislação que regule o setor é apontada pela generalidade das empresas como o maior obstáculo para a plena adoção desta tecnologia.

# Updating Portugal's Municipal Cartography: Exploring the Potential of UAV Technology

Luís Serra

## Abstract

The vast majority of Portuguese municipalities have digital cartography 1:10 000 scale outside the urban areas and 1:2000 scale in urban areas. The cartography of small areas has traditionally been updated using total stations or high precision GPS whilst that of large areas requires classical manned aerial photogrammetry. Amongst the activities of a municipality, updating of cartography is not a high priority therefore, when faced with budget cuts, common responses were to delay or reduce costs by partnering with neighbouring municipalities. In this context, the UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) and especially the micro and mini-UAVs class weighing less than 5 Kg, present an exciting opportunity for accomplish this task. Compared to classical manned aerial photogrammetry, the main advantages are; lower-cost, immediacy of use, even with cloudy weather conditions and ease of operation.

The national cartographic authority, the Directorate-General of Territory (DGT) published quality standards against any public cartography must be evaluated in order to be used. The UAV cartography is no exception.

The aim of our study is to evaluate the quality (especially the positional quality) of an UAV commercial solution, with respect to the standards imposed by DGT. To the best of our knowledge, this is the first study in Portugal, performing such an evaluation.

We used the swinglet CAM model of the Swiss enterprise Sensefly. We analysed and characterized the device technology, the flight planning, the flight execution and the products automatically obtained. We were impressed with the ease of planning and executing the flight. We confirmed the strong weather dependency of this system, even in light wind conditions and noted an intermittent loss of radio contact between the plane and the control station, which stopped the recording of GPS positions and orientations. After the flight, an automatic aerial triangulation was performed in the Sensefly post-processing software. During which, approximately one tiepoint per square meter were extracted, being more than what is expected from conventional automatic aerial triangulations. A vast amount of detailed information was produced. Of particular interest to us were: the internal orientation of camera

device, the external orientation (EO) of images, the digital surface model (DSM) and the orthophoto.

To perform bundle block adjustment and to measure positional quality, a total of 161 ground control points (GCPs) and checkpoints were measured in 2.5 days using a real-time GNSS measurement system GPS 1200 from Leica-Geosystems, with a measurement precision of 1.8 cm (3D standard deviation). The points measured were mainly located at the ground level but also in terraces, towers and flat roofs, largely using the Portuguese GNSS continuously operating reference station network RENEPE.

The plane device is equipped with an inertial navigation system (INS) linked to its GPS receiver. While the GPS provides absolute position information, the INS is responsible for determining the image sensor attitude therefore it is possible to achieve the EO parameters by means of direct georeferencing without using GCPs. In view of the lack of consensus regarding the definition, we defined direct georeferencing as *the process of independently reconstructing the geometry between real world objects (represented by some reference frame) and the image of that objects (represented by some image plane) integrating remote sensing and navigation systems*. Direct georeferencing was executed in MatLab software. We calculated a RMSE of 3.378 meters for absolute planimetric position of the projection centers and a RMSE of  $3.1685^\circ$  for *omega*,  $1.8127^\circ$  for *phi* and  $8.6723^\circ$  for *kappa* for the plane attitude, thus confirming the low accuracy of the GPS/INS equipment.

DSM has several possible applications, including true-orthophoto production and 3D modelling. We wanted to establish which interpolation method was the best to measure the DSM's height accuracy. We tested five deterministic interpolation methods: Nearest neighbour, linear method, natural neighbour, inverse distance weighting (IDW) and best triangle. Traditionally deterministic interpolation methods generate the Delaunay triangular irregular network of all the test field area, followed by the triangle identification that embraces the checkpoint, however the IDW and best triangle methods we used, only generate the polygon that best embraces the checkpoint under evaluation. Our test field was mainly composed of dense urban areas. To measure height accuracy the IDW and best triangle methods were most efficient. The best triangle method, with a RMSE of 0.6894 meters appeared to be the most appropriate for this type of terrain. This value should be interpreted with caution since we deliberately measured checkpoints close to breaklines. The automatically generated DSM did not model some terraces and a tower. This was likely due to: low flying height, low overlapping images, oblique photos, the complexity of the urban roofs and terraces.

We also evaluated the positional and thematic quality of the automatically produced true-orthophoto. The true-color ortho mosaic has a mean ground sample distance of 3.0 cm. A good radiometric quality in terms of color balancing was observed. Increasing the visualization scale we noticed the following thematic problems: non-linear rooftop edges, ghosting-effect and the occurrence of façades. The predominant problem was non-linear rooftop edges. Many of these situations were attributable to point cloud unique based DSM and could be improved with higher overlapping images. If the post-processing software allowed blending of DSM with object borders vectors, artefacts could be eliminated. The orthophoto positional accuracy was also tested using different samples of GCPs: 5, 10, 20 and 33 GCPs. We achieved a planimetric RMSE of 0.21 m for 5 GCPs; 0.11 m for 10 GCPs; 0.09 m for 20 GCPs; and 0.09 m for 33 GCPs. Using more than 20 GCPs did not confer additional benefit. The distribution of GCPs was more important than quantity.

Positional accuracy was tested in interactive photogrammetric platforms, because cartography restitution and updating must be done in such environment. The chosen platforms were Photomod workstation from Racurs and ImageStation Automatic Triangulation from Intergraph. In both photogrammetric workstations we used the post-processing results from Sensefly software. No stereoscopic model formations were achieved in Photomod when directly using the EO parameters from Sensefly. In order to overcome this problem we tested automatic aerial triangulation, using different configuration parameters in Photomod platform. The most optimum configuration achieved a planimetric RMSE of 1.158 meters, an altimetric RMSE of 0.139 meters for GCPs residuals and a global adjustment accuracy ( $\sigma_0$ ) of 1.424. The planimetric result achieved doesn't meet the standard of accuracy required by DGT ( $\text{RMSE} \leq 0.30$  meters, for 1:200 scale cartography). The positional accuracy of the same checkpoints in identical stereoscopic models produced by Intergraph and Photomod working stations was performed. The observed planimetric average residuals were 0.0436 meters for Intergraph and 1.3309 meters for Photomod. The observed altimetric average residuals were 0.0587 meters for Intergraph and 0.0780 meters for Photomod. The planimetric accuracy in Photomod stereo models is in excess of expectation. UAV imagery differs from classical aerial imagery in terms of tilt and overlap. The Intergraph software does not appear well adapted to UAV imagery as 10 of 38 block photographs were rejected. We used 2 checkpoints measured in 4 models; the small sample limits the strength of conclusions drawn. Despite this, the results achieved in the Intergraph stereo models merit further exploration.

An online questionnaire was sent to Portuguese cartography companies registered

with DGT, to gauge the level of knowledge regarding UAV technology and market preparedness. The questionnaire was send to 139 enterprises. Only 17 responses were received. All respondents were aware of the technology. 41% had already experimented with UAVs. 24% reported that UAVs were included in their business model. The product in greatest demand was ortophoto. The lack of appropriate legislation was considered an obstacle in a further commercial adoption of UAV technology.

## Agradecimentos

Este trabalho constitui, sobretudo, um desafio pessoal. Após vários anos com responsabilidades no controlo de qualidade de cartografia e sem formação de base em Engenharia Geográfica, quis compreender um pouco a teoria por detrás daquilo que fazia na prática. Sou um desacomodado. Os porquês perseguem-me. Detesto caixas negras. Hoje sinto que sei um pouco mais do que aquilo que sabia antes de iniciar esta aventura. Hoje tenho mais porquês. Multiplicaram-se. Mas tudo tem um fim. Este foi o meu. Por enquanto.

Começo por agradecer à minha mãe, sem a qual este trabalho teria sido infinitamente mais difícil. Grande mãe, por todo o apoio que me deu. Agradeço à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Paula Redweik, regente das disciplinas de Fotogrametria Analítica e Produção Cartográfica do presente mestrado, por ter aceite a orientação da tese, pelas correções e úteis conselhos. Duas pessoas foram muito importantes para mim neste percurso, pela amizade e inexcedível disponibilidade demonstrada (gabo-lhes a paciência): João Marnoto da SINFIC S.A. e Dr. João Dinis, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. João Marnoto, porque me conduziu para o tema da tese e porque, com ele aprendi a questionar e a não ter nada por adquirido: *as tuas certezas são o teu pior inimigo*. Sobretudo pela mão do Dr. João Dinis entrei no mundo novo e fascinante da programação, dos sistemas open-source e do L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Para ele serei sempre o *eterno gafanhoto, tentando chegar às partes mais altas e saborosas da erva*. Ao Afonso Barata, da SINFIC S.A., por todo o apoio que me deu nos trabalhos de campo com o UAV e também nos processamentos que se lhe seguiram. Ao Prof. Dr. Carlos Antunes, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, pela componente do apoio fotogramétrico realizado e disponibilidade demonstrada. Ao Prof. Dr. Virgílio Mendes, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, pelos esclarecimentos sobre ajustamentos e transformações de coordenadas e disponibilidade demonstrada (de que é prova a porta do seu gabinete sempre entreaberta). À Eng.<sup>a</sup> Fernanda Pontes, pelos utilíssimos conselhos e revisão cuidada. À Eng.<sup>a</sup> Joana Patrício, da CIMAA, pela indispensável ajuda no trabalho de campo com GPS e companheirismo. Ao Eng.<sup>o</sup> Henrique Fernandes, do município de Alter do Chão, pela ajuda com GPS. Ao Eng.<sup>o</sup> Rubens Murad, da Novageo, pela ajuda no software de aerotriangulação da Intergraph. À Dr.<sup>a</sup> Tara Shivaji, pela preciosa revisão inglesa do *Abstract*. Ao Lic. Nuno Fernandes, do município de Sousel, pelo apoio logístico. À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Andreia Silva e Prof. Dr. Paulo Nogueira, da Direção-Geral da Saúde, pelo apoio e compreensão. À Manuela Rebelo, por esclarecimentos relacionados com aspetos comerciais.

À SINFIC S.A., pela disponibilização do UAV e apoio logístico. À CIMAA,



por ter aceite o enquadramento da tese no seu Plano de Atividades e por ter posto à minha disposição o GPS e apoio logístico. À Câmara Municipal de Sousel, por todo o apoio logístico. À Novageo S.A., pela utilização da estação fotogramétrica da Intergraph. À Sensefly, por esclarecimentos prestados e cedência de imagem.

Por último uma palavra muito especial para toda a família e amigos, os quais privei inúmeras vezes da minha companhia durante esta jornada.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sistema UAV utilizado e voo</b>	<b>5</b>
2.1	Caracterização e funcionamento do UAV . . . . .	5
2.2	Caracterização do software associado . . . . .	7
2.3	Realização do voo . . . . .	8
2.4	Produtos gerados pelo voo . . . . .	11
2.4.1	Produtos gerados pelo software e-mo-tion . . . . .	11
2.4.2	Produtos gerados pelo software PostFlight Suite . . . . .	11
2.4.3	Produtos gerados pelo software Postflight Terra 3D . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Apoio Fotogramétrico</b>	<b>19</b>
3.1	Posicionamento em modo base-RTK clássico . . . . .	20
3.2	Posicionamento em modo base-RTK e rede RENEP . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Georreferenciação direta</b>	<b>25</b>
4.1	Considerações prévias . . . . .	28
4.2	Transformações . . . . .	31
4.3	Resultados obtidos . . . . .	42
4.4	Sumário e conclusões . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Análise do Modelo Digital de Superfície</b>	<b>47</b>
5.1	Análise de alguns métodos de interpolação . . . . .	54
5.2	Estudo comparativo dos métodos de interpolação . . . . .	61
5.3	Sumário e conclusões . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Análise da qualidade da ortofotografia</b>	<b>69</b>
6.1	Análise da qualidade temática . . . . .	71
6.2	Análise da qualidade posicional . . . . .	72
6.3	Análise da influência do n.º e disposição de PFs . . . . .	75

6.4	Sumário e conclusões . . . . .	77
<b>7</b>	<b>Análise em ambiente de fotogrametria interativa</b>	<b>81</b>
7.1	Metodologia . . . . .	82
7.2	Resultados . . . . .	85
7.3	Sumário e conclusões . . . . .	93
<b>8</b>	<b>Questionário a produtores de cartografia</b>	<b>95</b>
8.1	Metodologia . . . . .	95
8.2	Resultados . . . . .	98
8.3	Sumário e conclusões . . . . .	100
<b>9</b>	<b>Conclusões e perspectivas</b>	<b>103</b>
9.1	Conclusões . . . . .	103
9.2	Perspetivas futuras . . . . .	105
<b>A</b>	<b>Diferenças dos desvios: vizinho mais próximo</b>	<b>111</b>
<b>B</b>	<b>Diferenças dos desvios - todos os métodos</b>	<b>113</b>
<b>C</b>	<b>Fórmula de sigma_0 usada pelo Photomod</b>	<b>115</b>

# Índice de Figuras

1.1	Comparação de alguns métodos de medição em relação com a exatidão e tamanho do objeto/área a levantar . . . . .	3
2.1	Imagem do aparelho UAV utilizado no estudo . . . . .	6
2.2	Componentes exteriores do UAV . . . . .	6
2.3	Área de estudo assinalada pelo retângulo azul desenhado sobre extrato da carta militar 1:25000 e enquadramento do município de Sousel no contexto nacional. A seta vermelha indica o geodésico Bazonas utilizado para o apoio fotogramétrico. . . . .	9
2.4	Preparação do voo no software e-mo-tion. . . . .	10
2.5	Acompanhamento do decorrer do voo no software e-mo-tion . . . .	10
2.6	Extrato de um ficheiro <i>log</i> produzido pelo software e-mo-tion. . . .	11
2.7	Visualização em <i>google earth</i> do ficheiro kml com o traçado do voo gerado pelo software e-mo-tion. . . . .	12
2.8	Extrato de um ficheiro de texto produzido pelo software Postflight Suite, com as posições e orientações aproximadas de cada imagem do voo realizado. . . . .	12
2.9	Ortofografia produzida pelo software Postflight Terra 3D. . . . .	13
2.10	Extrato de um ficheiro de texto produzido pelo software Postflight Terra 3D com as posições e orientações mais exatas de cada imagem	13
2.11	Visualização em Meshlab [22] de um extrato do ficheiro PLY produzido pelo software Postflight Terra 3D. . . . .	14
2.12	Qualidade final do ortomosaico produzido. As zonas a vermelho indicam as áreas onde o ortomosaico e o MDS podem conter artefactos.	15
2.13	Desvio planimétrico entre coordenadas GPS pré-ajustamento e coordenadas GPS ajustadas . . . . .	16
2.14	Extrato do ficheiro de texto com a nuvem de pontos cotados . . . .	17
3.1	Metodologia adotada de posicionamento em modo base-RTK e estação de referência em vértice geodésico . . . . .	20

3.2	Metodologia adotada de posicionamento em modo base-RTK e rede RENEP . . . . .	21
3.3	Localização da estação de referência, no topo do edifício da Câmara Municipal de Sousel. . . . .	22
3.4	Pormenor do trabalho de medição de um ponto de controlo/fotogramétrico em modo base-RTK. . . . .	22
3.5	Pormenor dos vetores resultantes do ajustamento da estação de referência a partir das estações RENEP . . . . .	23
4.1	Regra dos sistemas de mão direita . . . . .	28
4.2	Sentidos positivos de rotação dos eixos de um sistema cartesiano. .	29
4.3	Sistema de referência do sensor imagem . . . . .	32
4.4	Disposição do SR do sensor imagem no corpo do avião . . . . .	33
4.5	Definição dos ângulos de rotação de <i>Euler</i> . . . . .	34
4.6	Relação entre o SR local global e o SR ECEF . . . . .	35
4.7	Alteração do plano tangente ao elipsóide devido à mudança de datum	36
4.8	Exemplo da componente planimétrica de 3 SR locais nacionais e 3 SR tangentes auxiliares e relação com o SR projetado . . . . .	40
4.9	Imagem da georreferenciação direta do sub-bloco montado em ambiente Photomod com os parâmetros de posição e orientação calculados. . . . .	44
4.10	Imagem do sub-bloco montado em ambiente Photomod com os parâmetros de posição e orientação ajustados. . . . .	44
5.1	Possível abordagem para aplicação do método de interpolação linear	50
5.2	Coordenadas baricêntricas ( $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ ) normalizadas do ponto P. . .	51
5.3	Interpolação por vizinhos naturais . . . . .	51
5.4	Exemplo de ponto de controlo em que o método do vizinho mais próximo foi considerado o melhor método . . . . .	56
5.5	Ponto de controlo situado numa torre e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto . . . . .	58
5.6	Ponto de controlo 106 e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto . . . . .	59
5.7	Ponto de controlo 110 e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto. Vista de topo. . . . .	59
5.8	Ponto de controlo 110 e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto. Vista de frente. . . . .	60

5.9	Ponto de controlo 110 e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto. Vista da direita. . . . .	60
5.10	Ponto de controlo 48 e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto . . . . .	63
5.11	Ponto de controlo 96 e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto . . . . .	64
5.12	Ponto de controlo 46 e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto . . . . .	65
5.13	Ponto de controlo 28 e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto . . . . .	66
5.14	Ponto de controlo 136 e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto . . . . .	67
6.1	Comparação entre uma ortofoto clássica cuja retificação se baseia num MDT e uma ortofoto real cuja retificação se baseia num MDS (adaptado de [26]). . . . .	70
6.2	Diferentes tipos de artefactos encontrados na ortofoto . . . . .	72
6.3	Artefacto do tipo “efeito-fantasma”. . . . .	72
6.4	Disposição dos pontos de controlo e pontos fotogramétricos no enquadramento da ortofoto . . . . .	74
6.5	Desvios dos pontos de controlo em relação ao desvio máximo admitido para a escala da carta 1:2000 . . . . .	74
6.6	Parte não renderizada da ortofoto inicial, com novo processamento de 5 e 20 PFs e nova versão do software Postflight Terra 3D . . . .	76
6.7	Extrato do relatório com as sobreposições entre fotografias calculadas para cada pixel do ortomosaico . . . . .	77
6.8	Disposição dos pontos de controlo e pontos fotogramétricos pela ortofoto nos 4 processamentos realizados . . . . .	78
6.9	Desvios dos pontos de controlo em relação ao desvio máximo admitido para a escala da carta 1:1000 para os 4 processamentos realizados	79
7.1	Sub-bloco escolhido da área do projeto, constituído por 38 fotografias dispostas em 3 fiadas. . . . .	82
7.2	Localização dos pontos fotogramétricos e pontos de controlo na área aproximada do sub-bloco . . . . .	84
7.3	Distribuição típica dos pontos objeto dos processamentos em estudo	85
7.4	N.º médio de pontos por imagem nos três sistemas em estudo. . . .	92
8.1	Tipo de entidade questionada perante as Finanças. . . . .	98

8.2	Produtos com base em UAVs, comercializados pelas empresas in-	
	quiridas que exploram esta tecnologia. . . . .	99
8.3	Maiores barreiras apontadas pelas empresas do estudo à utilização	
	de UAVs com fins comerciais. . . . .	100

# Índice de Tabelas

2.1	Resumo das características do true-ortofoto automaticamente produzido. . . . .	14
2.2	Resumo do número de pontos homólogos e pontos de ligação utilizados para o ajustamento em bloco e erro médio de reprojeção dos pontos homólogos no espaço foto. . . . .	15
4.1	Sistemas de referência utilizados . . . . .	29
4.2	Resumo dos resultados obtidos para o cálculo da posição dos centros de projeção em ETRS89/PT-TM06. . . . .	42
4.3	Resumo dos resultados obtidos para a matriz de rotação BLUH. . . .	43
4.4	Resumo dos resultados obtidos para a matriz de rotação PATB. . . .	43
5.1	$EMQ_z$ calculado para os 3 métodos em análise e diferenças entre o melhor método e os restantes. . . . .	55
5.2	$EMQ_z$ calculado para os 4 métodos em análise e diferença entre o melhor método e os restantes. . . . .	61
6.1	Erros posicionais planimétricos permitidos na ortofotografia em função da escala da carta. . . . .	73
6.2	Erros e percentagem de desvios dentro da tolerância para os diferentes processamentos realizados e escalas de carta. . . . .	76
7.1	Principais parâmetros de configuração da ATA para os processamentos testados. . . . .	84
7.2	Legenda dos símbolos dos pontos objeto utilizados para o ajustamento do sub-bloco em estudo. . . . .	85
7.3	Qualidade da aerotriangulação dos processamentos analisados, tendo em consideração os resíduos dos PFs e ajustamento global. . . . .	86
7.4	Erros máximos permitidos na fase de triangulação aérea. Diferença entre pontos da TA e pontos de verificação. . . . .	88



7.5	Resíduos da medição interativa dos pontos de controle (PC) nos modelos do melhor processamento. . . . .	89
7.6	Resíduos máximos permitidos pela DGT para a orientação absoluta dos modelos. . . . .	89
7.7	Qualidade da aerotriangulação do processamento número 6, tendo em consideração os resíduos dos PFs e ajustamento global. . . . .	89
7.8	Resíduos da medição interativa dos pontos de controle (PC) nos modelos do processamento número 6. . . . .	90
7.9	Resíduos resultantes da medição interativa dos pontos de controle (PC) na ortofotografia produzida pela Sensefly. . . . .	91
7.10	Resíduos resultantes da medição interativa dos pontos de controle (PC) nos mesmos modelos, em ambiente Intergraph e Photomod. . .	92
A.1	Diferenças entre o desvio do método do vizinho mais próximo e os desvios dos restantes métodos em análise (linear_matlab e vizinhos naturais), para os pontos de controle em que o método do vizinho mais próximo foi considerado o melhor método. Apenas se apresentam os pontos com desvios significativos, conforme tabela seguinte. . . . .	112
A.2	Valores de sigma calculados (desvio padrão amostral). . . . .	112
B.1	Diferenças entre todas as combinações dos desvios absolutos dos métodos analisados. Apenas se apresentam os pontos com desvios significativos, conforme tabela seguinte. . . . .	114
B.2	Valores de sigma calculados (desvio padrão amostral). . . . .	114

# Lista de Abreviaturas

- ATA** AeroTriangulação Automática. xix, 81, 83, 84, 86, 91, 93
- BLUH** Bundle block adjustment Leibniz University Hannover. xix, 41–43
- C/A** Clear/Acquisition. 5, 19
- CP** Centro de Projeção. 30, 31
- DGT** Direção-Geral do Território. xx, 1, 20, 21, 42, 47, 48, 54, 67, 71–73, 75, 76, 88, 89, 92, 94, 95, 97, 103–105
- ECEF** Earth Centred, Earth Fixed. xvi, 26, 29, 33–39
- EF** Earth Fixed. 29, 37–39
- EMQ** Erro Médio Quadrático. 43, 45, 73, 74, 76, 86, 88, 90
- ENU** East, North, Up. 28, 29, 33, 40
- EPSG** European Petroleum Survey Group. 28
- ETRF** European Terrestrial Reference Frame. 36
- ETRS89** European Terrestrial Reference System 1989. xix, 12, 17, 19, 20, 27–29, 31, 35, 36, 38, 42
- EUREF** European Reference Frame. 36
- EXIF** Exchangeable Image File Format. 7, 12
- GB** GigaBytes. 48
- GHz** GigaHertz. 48
- GK** Gauss-Krüger. 30

**GNSS** Global Navigation Satellite System. 2, 21

**GPS** Global Positioning System. xv, 2, 5, 7, 11, 12, 16, 19, 26, 31, 34, 36, 42, 44, 79, 93

**GRS80** Geodetic Reference System 1980. 29

**IDW** Inverse Distance Weighting. 48, 52–55, 61–67

**IMU** Inertial Measurement Unit. 5, 26, 31, 33

**INS** Inertial Navigation System. 2, 5, 26, 29, 31, 44

**IPCC** Instituto Português de Cartografia e Cadastro. 1

**ITRF** International Terrestrial Reference Frame. 36

**LIDAR** Light Detection And Ranging. 2, 97, 99

**M,P,H** Distância à Meridiana, Distância à Perpendicular da Meridiana, Altitude Ortométrica. 17, 85

**MDE** Modelo Digital de Elevação. 27, 57

**MDS** Modelo Digital de Superfície. xv, xvii, 8, 15, 47, 55, 57–60, 62–67, 69, 70, 77, 103, 104

**MDT** Modelo Digital de Terreno. xvii, 47, 67, 69, 70

**MNA** Modelo Numérico Altimétrico. 47, 67, 89

**MNT** Modelo Numérico Topográfico. 20, 89

**NED** North, East, Down. 28, 29, 33, 39, 40

**OE** Orientação Externa. 25, 27, 30, 35

**OI** Orientação Interna. 25

**PATB** Programm für AeroTriangulation Bundle. xix, 42, 43

**PC** Ponto de Controlo. 23, 61, 62, 64, 74–76

**PF** Ponto Fotogramétrico. xvii, xix, xx, 8, 12, 14, 16, 19–21, 23, 26, 71, 74–78, 84–89, 91, 104, 105

**PLY** Polygon File Format. xv, 14

**PT-TM06** Transversa de Mercator 2006 Portugal. xix, 12, 17, 19, 20, 27, 28, 31, 42

**RAM** Random Access Memory. 48

**RENEP** Rede Nacional de Estações Permanentes. xvi, 21, 23

**RGB** Red, Green, Blue. 6

**RTK** Real Time Kinematic. xv, xvi, 20–23

**SIFT** Scale-Invariant Feature Transform. 8, 93

**SR** Sistema de Referência. xvi, 28–35, 37–41, 43, 45

**TA** Triangulação Aérea. xix, 88

**TIN** Triangular Irregular Network. 8, 47

**TM** Transversa de Mercator. 30

**TM06** Transversa de Mercator 2006. 29, 30, 42

**TWG** Technical Working Group. 36

**UAS** Unmanned Aircraft System. 2

**UAV** Unmanned Aerial Vehicles. xv, xviii, 2–6, 16, 19, 26, 27, 31, 33, 34, 42–45, 54, 75, 77, 83, 93–101, 103–105

**UTM** Universal Transversa de Mercator. 27

**VANT** Veículos Aéreos Não Tripulados. 2

**VG** Vértice Geodésico. 20

**WGS84** World Geodetic System 1984. 8, 13, 26, 29, 31, 34, 36, 42



# Capítulo 1

## Introdução

Uma das principais atribuições dos municípios é a gestão do seu próprio espaço. Questões como: onde se pode construir? Quais as melhores localizações para ecopontos e contentores de resíduos domésticos? Qual o circuito para recolha de resíduos urbanos que me permite poupar mais combustível? Quais os troços da estrada municipal em mau estado? É todo um sem número de perguntas que se colocam todos os dias aos autarcas e que envolvem o espaço físico. Consequentemente a existência de inteligência geográfica é uma mais-valia, senão mesmo uma condição indispensável para os municípios prosseguirem a sua missão do modo mais eficiente e eficaz possível. Neste contexto, a cartografia de base topográfica assume um papel fundamental, pela qualidade e diversidade de temas nela presentes (rede viária, equipamento urbano, espaços verdes, edificado, vegetação, etc.) e também pela qualidade posicional e de completude, normalmente exigidas pela Autoridade Nacional de Cartografia, a Direção-Geral do Território (DGT). Por este motivo, os municípios têm vindo a adquirir cartografia topográfica oficial ou homologada, desde o ano de 1995, altura em que foram lançados os primeiros concursos da série cartográfica nacional 1:10000, pelo então IPCC (Instituto Português de Cartografia e Cadastro), atualmente integrado na DGT. Para além da cobertura do território concelhio à escala 1:10000, uma grande maioria dos municípios tem investido na escala 1:2000 nas zonas urbanas. As razões da escolha destas escalas prendem-se com a necessidade de obedecerem a requisitos mínimos de exatidão posicional e temática para elaboração das cartas de base a utilizar nos instrumentos de gestão territorial, consignados pela legislação [6] e também porque a atribuição de auxílios financeiros privilegiava estas escalas [7]. A cartografia topográfica podendo considerar-se uma “fotografia” da ocupação e uso do território num determinado momento do tempo, traz-nos um primeiro desafio: esta ocupação e uso do território não é estática mas dinâmica o que configura imediatamente a questão da desatualização, que é tanto maior quanto mais dinâmico

for o município e/ou quanto mais tempo tiver passado entre a realização do voo fotogramétrico (e respetiva completagem de campo) e a sua efetiva utilização. Esta desatualização tem sido resolvida ou minorada por uma de duas formas: ou através de levantamentos topográficos clássicos, com estações totais e GPS, no caso de pequenas áreas, ou através de levantamentos aerofotogramétricos clássicos, no caso de grandes áreas (o território de um ou mais municípios, por exemplo). Mas como fazer quando se pretende cartografar uma ou mais áreas de dimensão intermédia? Nestes casos, os métodos clássicos referidos não dão uma resposta adequada: seja pela morosidade dos levantamentos, seja pelos custos associados. No caso de municípios com baixa densidade populacional e menor poder económico a solução poderá passar pela realização de um levantamento aerofotogramétrico clássico a executar por um conjunto de municípios vizinhos com as mesmas necessidades, numa lógica de economias de escala. No entanto esta solução pode por vezes não ser compatível com as necessidades e dinâmicas próprias de cada município. Uma possível solução poderá passar pela utilização de veículos aéreos não tripulados, devidamente apetrechados para a realização de missões fotogramétricas. Estes pequenos veículos aéreos podem ser equipados com câmaras fotográficas e/ou de vídeo, sensores térmicos, sensores de infravermelhos, câmaras multiespectrais, sensores LIDAR, ou uma combinação de vários destes sensores, tudo dependendo da sua capacidade de carga [11]. Para além de toda esta panóplia de sensores, os UAVs (da terminologia inglesa *Unmanned Aerial Vehicles*) podem ainda ser equipados com sistemas GNSS/INS (*Global Navigation Satellite System/Inertial Navigation System*), altímetros e bússolas. Os UAVs têm sido alvo de aturada investigação pelo enorme potencial que representam (mas não só) para a realização de cartografia de grande escala, combinando fotogrametria terrestre e aérea a custos menores e num menor espaço de tempo do que os métodos clássicos (ver figura 1.1).

Os UAVs, tal como o próprio nome sugere, são veículos aéreos não tripulados que podem ser remotamente controlados ou completamente autónomos ou ainda uma combinação de ambos. Em língua portuguesa é muitas vezes utilizado o acrónimo “VANT”. Adotaremos no entanto a terminologia internacional mais comum, UAV, apesar de, mais recentemente (e quiçá mais correto) ter surgido o termo “UAS”, de *Unmanned Aircraft System*, porque se refere a todo o sistema em jogo: UAV + Estação de Controlo Terrestre.

Com base em diversa bibliografia consultada, as maiores vantagens relatadas dos UAVs comparativamente aos sistemas tripulados, prendem-se com o facto de os UAVs poderem voar em zonas normalmente inacessíveis, tais como áreas montanhosas, áreas vulcânicas, regiões sísmicas, áreas desérticas, áreas sob inundações zonas de

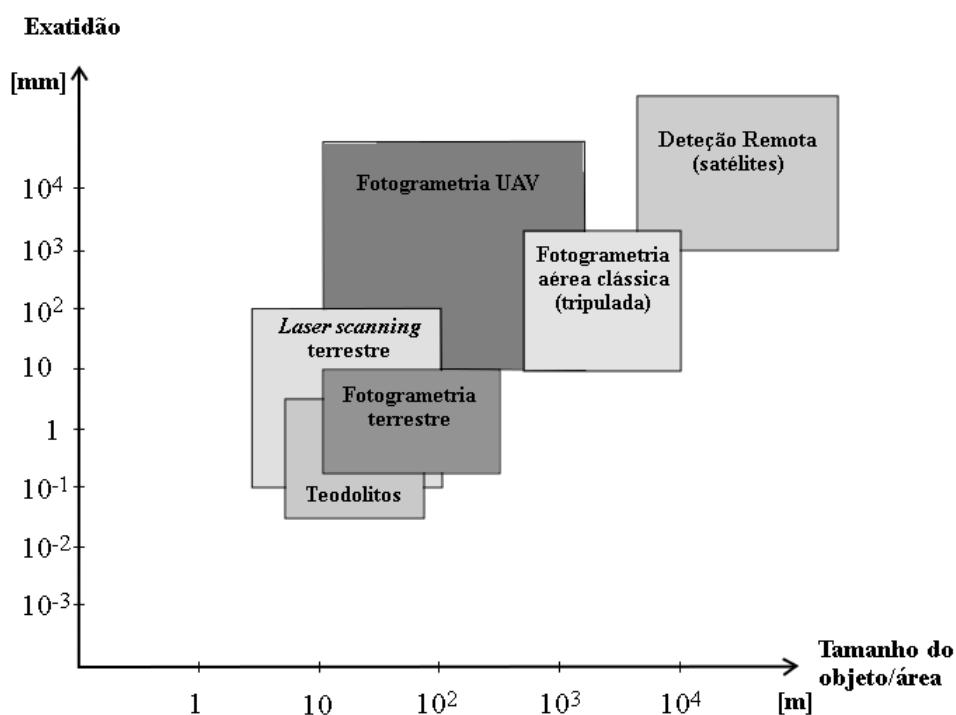


Figura 1.1: Comparação de alguns métodos de medição em relação com a exatidão e tamanho do objeto/área a levantar (adaptado de [11]).

acidentes e zonas de incêndios ou ainda a maior disponibilidade de utilização destes aparelhos. Porque realizam voos normalmente a uma altitude inferior à altitude a que normalmente voam os aviões tripulados poderão, em muitos casos, voar abaixo das nuvens, conseguindo assim cumprir a sua missão. Por outro lado, não sendo tripulados, têm custos de aquisição e operação bastante mais reduzidos. Incidindo o nosso estudo sobre a classe dos micros/mini UAVs, que não ultrapassa os 5 kg [11], as maiores desvantagens estão relacionadas com a baixa capacidade de carga destes aparelhos, que obriga à escolha de sensores fotogramétricos, de posicionamento e orientação pequenos e leves e necessariamente de menor qualidade, embora sejam também de menor custo. Outra desvantagem relacionada com o baixo peso dos aparelhos, é a extrema dependência das condições atmosféricas, nomeadamente do vento e da chuva. Por último, registámos também problemas de comunicação rádio entre o aparelho e a estação terrestre de controlo, comunicação esta essencial para a aquisição de dados de orientação e posicionamento.

O grande objetivo deste trabalho consiste no estudo da aplicabilidade desta tecnologia à produção e atualização de cartografia de base municipal. Especificamente o estudo e caracterização dos produtos automaticamente obtidos com uma das tecnologias de UAVs atualmente presentes no mercado, incluindo a qualidade posicional do modelo digital de superfície e a qualidade posicional e temática da ortofotogra-



fia. Pretende-se também estudar a qualidade posicional da triangulação aérea e dos modelos estereoscópicos, realizada a partir das imagens e parâmetros fornecidos por este sistema.

De modo a cumprir os objetivos atrás enunciados, começamos por caracterizar no capítulo 2 o funcionamento do sistema UAV escolhido, a escolha da área de testes, o planeamento e realização do voo; no capítulo 3 caracterizamos os trabalhos de campo com vista à recolha de uma amostra de pontos fotogramétricos e de pontos de controlo; no capítulo 4 testamos um método expedito de georreferenciação das imagens sem recurso a pontos de apoio, conhecido por *georreferenciação direta*; no capítulo 5 analisamos a qualidade posicional do modelo digital de superfície resultante da aerotriangulação realizada pelo software de pós-processamento do UAV; No capítulo 6 analisamos a qualidade posicional e temática da ortofotografia automática produzida também pelo software de pós-processamento do UAV; no capítulo 7 analisamos a qualidade posicional da triangulação aérea e dos modelos num ambiente de fotogrametria interativa; no capítulo 8 fazemos um pequeno “retrato” do estado da arte desta tecnologia no mercado nacional, através da realização de um inquérito às empresas de cartografia; Finalmente as conclusões no capítulo 9.

## Capítulo 2

# Sistema UAV utilizado e voo

### 2.1 Caracterização e funcionamento do UAV

O aparelho utilizado para o nosso estudo é o modelo swinglet CAM da empresa suíça Sensefly (figura 2.1).

Pesa cerca de 500 gramas (bateria e máquina fotográfica incluído), tem uma envergadura de 80 cm, é feito de poliestireno expandido (esferovite) e tem uma capacidade de carga de apenas 125 gramas [37]. O baixo peso deste aparelho, combinado com a espuma de esferovite de que é composto, torna-o razoavelmente seguro em caso de acidente, já que a sua energia de impacto se pode comparar à energia de impacto de uma ave de porte médio [15]. De uma forma muito simples, o aparelho é composto pelo seguinte equipamento [15]: um pequeno chip de GPS que lhe confere a posição com uma exatidão que varia tipicamente entre 5 e 10 metros, baseada apenas na leitura do código de aquisição livre ou C/A (*Clear/Acquisition*); um sistema inercial IMU (*Inertial Measurement Unit*) que lhe confere os 3 ângulos de orientação de Euler (*roll*, *pitch* e *heading*), com uma exatidão que varia entre 3 a 5 graus <sup>1</sup>; um radio transmissor, com um alcance que pode chegar aos 2 Km ou mais (depende da orografia do terreno) e que é usado para estabelecer a comunicação entre o software e-motion (que falaremos mais adiante) e o piloto automático do UAV que, por sua vez, é responsável por controlar não apenas o estado do próprio aparelho mas é sobretudo por seguir um plano de voo previamente traçado, com a ajuda também de sensores de pressão atmosférica e medidores da velocidade do vento (figura 2.2).

O fornecimento de energia é assegurado por uma pequena bateria de iões de lítio

---

<sup>1</sup>O IMU é o componente principal do sistema INS, fornecendo-lhe continuamente dados de velocidade e orientação do aparelho. Com estes dados o INS está constantemente a calcular a sua posição corrente, sendo deste modo responsável pela navegação.



Figura 2.1: Imagem do aparelho UAV utilizado no estudo. Cortesia SINFIC S.A.

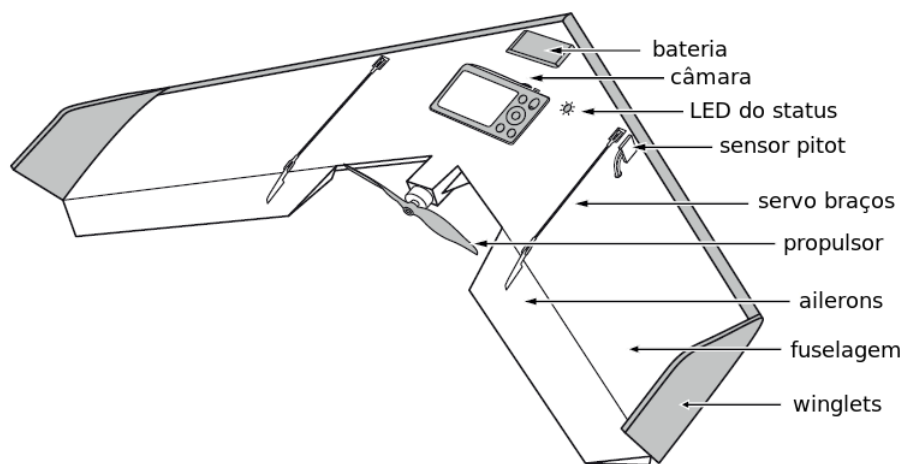


Figura 2.2: Componentes exteriores do UAV. Cortesia Sensefly.

que lhe confere uma autonomia até 30 minutos de operação, desde que as condições atmosféricas o permitam (sem chuva e velocidades de vento inferiores a 20km/hora). A câmara utilizada foi uma Canon IXUS 220HS (RGB), com 12 Megapixéis (4000 x 3000 pixéis). A configuração da câmara para a tomada de fotografias é inteiramente automática: focagem automática, configurações automáticas de velocidade de disparo e abertura do diafragma. Por outro lado, de modo a proteger a câmara durante as operações de descolagem e aterragem, a câmara é desligada [37]. Durante as operações de tomada de fotos e de modo a diminuir o risco de desfocagem nas fotografias, o piloto automático realiza um conjunto de operações pré-programadas devido à turbulência ou vibrações do motor, sendo a mais significativa o desligamento do motor durante alguns segundos, ao mesmo tempo que o avião é estabilizado numa atitude tanto quanto possível horizontal. Logo que a fotografia tenha sido realizada, a navegação normal é retomada e a resultante perda de altitude ou desvio do percurso traçado é imediatamente corrigida pelo piloto automático [15].

## 2.2 Caracterização do software associado

**E-mo-tion:** Para além de estabelecer a ligação entre a base e o aparelho durante o voo, é também responsável por gerar diversos ficheiros *log* com inúmeros dados do voo para análise e processamento posterior. De entre os diversos dados que são registados, destacam-se o registo de coordenadas GPS (registo ao segundo), o registo dos ângulos de *Euler* e o registo da hora, minuto e segundo da tomada das fotos. Por outro lado e previamente à realização do voo, o software *e-mo-tion* permite desenhar um plano de voo tendo como parâmetros de entrada a delimitação geográfica da área a voar, a resolução espacial desejada (que varia tipicamente entre 3 e 30 cm) e, finalmente, a percentagem de sobreposição lateral e longitudinal pretendida [34]. Depois de delineado o plano de voo, este fica disponível pelo piloto automático do aparelho para autonomamente cumprir a sua missão.

**Postflight Suite:** Com base nos ficheiros *log* do voo anteriormente referidos, este software vai marcar cada uma das fotografias no formato EXIF com a posição do centro de projecção da câmara e a orientação do plano imagem. Ainda sem qualquer processamento realizado, as incertezas nesta fase são de 5 – 10 metros para a posição e 3 – 5 graus para a orientação [15].

**Postflight Terra 3D:** Uma grande mais-valia tecnológica deste sistema assenta neste software, que é responsável por posicionar e orientar as imagens do bloco em estudo com mais exatidão e por produzir ortofotografias. Todo este processamento é totalmente automático ou semi-automático (se desejarmos maior exatidão posicional com a inclusão de alguns pontos fotogramétricos). Para além do mais, o Postflight Terra 3D fornece os parâmetros de calibração da câmara fotográfica e os parâmetros de orientação externa, exigidos por uma vasta maioria de softwares clássicos de fotogrametria [34]. Em alternativa à aquisição deste software (que é vendido à parte dos restantes softwares e aparelho), pode ser utilizado um serviço web pago, disponibilizado pela empresa Pix4D [34]. O processamento automático de imagens disponibilizado pelo Postflight Terra 3D, para além de incorporar todos os conceitos clássicos da fotogrametria digital, como o ajustamento por feixes perspetivos com parâmetros adicionais por exemplo, baseia-se muito em novos conceitos e algoritmos provenientes da ciência de visão por computador (especialmente na fase inicial do processamento fotogramétrico, a fase relativa à triangulação aérea). De uma forma sumária, as fases seguidas pelo software Postflight Terra 3D são as seguintes [15]:

1. O software começa por determinar pontos de interesse (*keypoints*, na terminologia inglesa) em cada imagem e respetivos descritores;
2. Através do algoritmo SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) e com base nos descritores de cada ponto de interesse, o software vai procurar pontos de interesse homólogos noutras imagens;
3. Este conjunto de pontos homólogos juntamente com os valores aproximados de posição e orientação das imagens e as coordenadas retangulares de eventuais PFs que tenham sido levantados, vão entrar como parâmetros de observação para um ajustamento em bloco por feixes perspetivos que visa recuperar, para cada imagem, a posição e orientação da câmara com maior exatidão;
4. Durante a realização do ajustamento os pontos homólogos são verificados e são calculadas as coordenadas 3D dos respetivos pontos de ligação (*tiepoints*, na terminologia inglesa) no mesmo sistema de coordenadas retangulares dos PFs (se não forem usados PFs é somente usado o sistema WGS84);
5. Como resultado do ajustamento, para além das coordenadas terreno dos pontos de ligação, são também calculados os parâmetros de orientação externa mais exatos;
6. De seguida os pontos de ligação são triangulados de modo a formar-se uma rede irregular de triângulos (TIN) e o consequente Modelo Digital de Superfície (MDS) podendo, nesta fase, serem gerados mais pontos objeto e densificada a rede de triângulos;
7. Por fim, cada pixel das imagens é projetado no MDS, procedendo-se ao cálculo do ortomosaico devidamente georreferenciado (true-ortofoto).

Todo este processamento descrito e ainda o cálculo dos parâmetros de calibração da câmara são completamente automáticos, sem necessidade de interação humana. No entanto, com a inclusão de alguns pontos fotogramétricos, a exatidão posicional da ortofotografia pode melhorar de 2 – 8 metros para 0.05 – 0.2 metros, apesar desta exatidão não se verificar em toda a área do ortomosaico [15].

## 2.3 Realização do voo

A área de estudo escolhida para o projeto foi a parte norte da vila de Sousel (e sede de concelho), situada a sul da região do Alto Alentejo, com uma área aproximada de

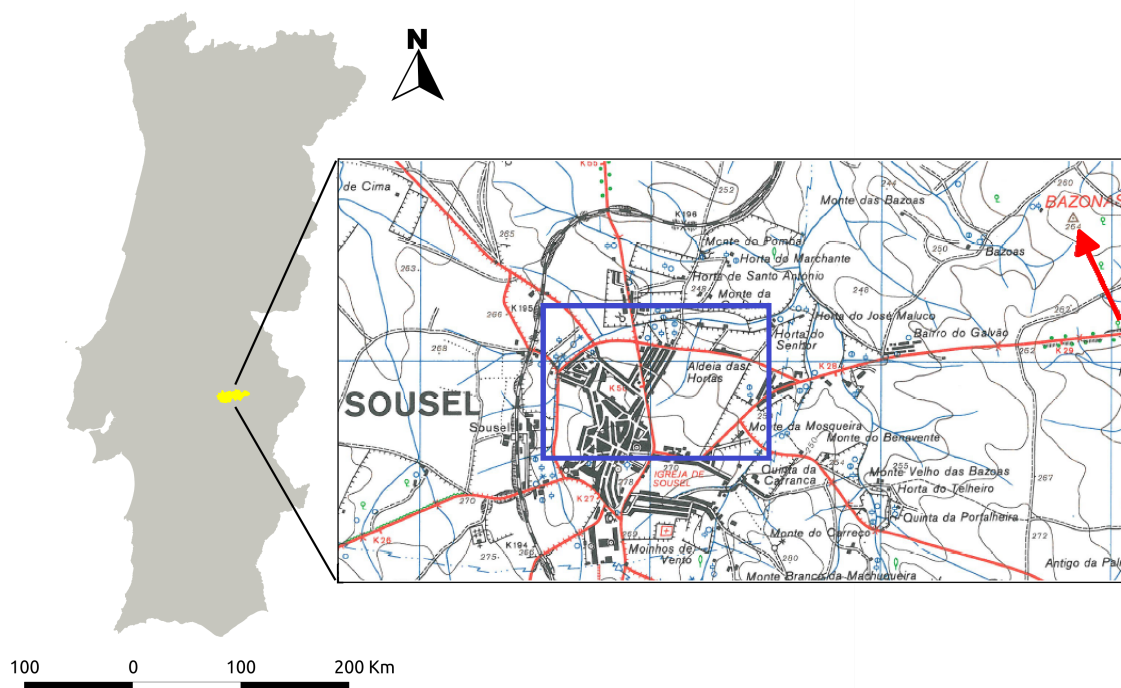


Figura 2.3: Área de estudo assinalada pelo retângulo azul desenhado sobre extrato da carta militar 1:25000 e enquadramento do município de Sousel no contexto nacional. A seta vermelha indica o geodésico Bazonas utilizado para o apoio fotogramétrico.

58 hectares e cuja ocupação do solo é predominantemente constituída por edificado, por vezes complexo em forma, e campos agrícolas (figura 2.3).

O voo na base deste estudo foi realizado no dia 11 de Janeiro de 2013, tendo-se registado neste dia condições meteorológicas favoráveis, especialmente a ausência de chuva e velocidade do vento inferior a 20 km/hora. A preparação do voo foi realizada da forma já descrita: no software e-mo-tion, delimitou-se graficamente a área geográfica correspondente à área que se pretendeu voar. De seguida escolheu-se a resolução espacial (3 cm) e, finalmente, definiu-se a percentagem de sobreposição transversal (60%) e longitudinal (90%) entre imagens. Após estas 3 etapas muito simples, o software e-mo-tion, propôs um plano de voo (figura 2.4), com fiadas, altura do voo e coordenadas dos pontos de tomada das fotos.

Para a descolagem e aterragem do avião foi escolhido um campo de futebol existente nas imediações da área de estudo. A descolagem do aparelho é realizada da seguinte forma: abana-se energicamente 2 ou 3 vezes o aparelho para cima e para baixo, fazendo com que o pequeno motor elétrico se ligue. A partir desse momento larga-se o aparelho e deixa-se o piloto automático cumprir o plano de voo inicialmente traçado. Quase todo o plano de voo foi seguido através da aplicação e-mo-tion instalada num computador portátil (figura 2.5). Durante uma pequena



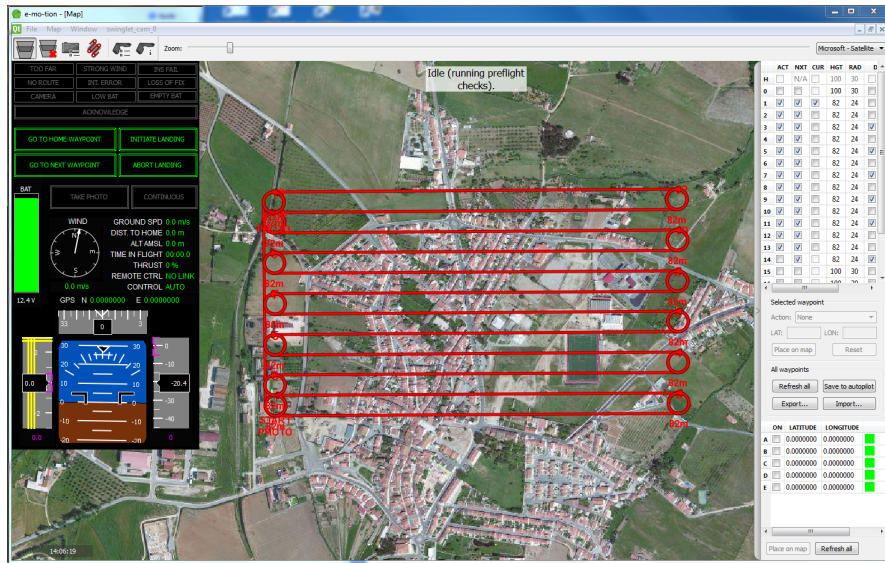


Figura 2.4: Preparação do voo no software e-mo-tion.

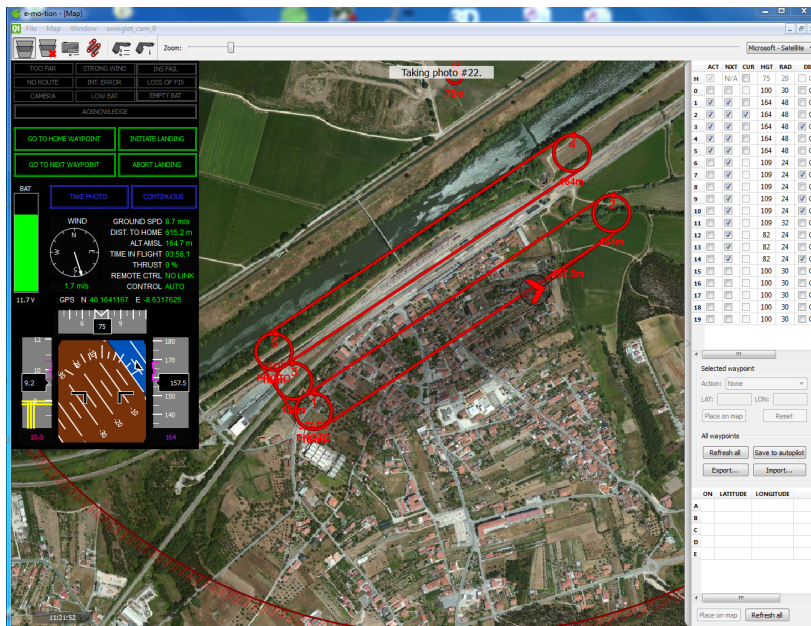


Figura 2.5: Acompanhamento do decorrer do voo no software e-mo-tion (imagem exemplificativa, não pertencente ao voo realizado).Cortesia SINFIC S.A.

parte do plano de voo, perdeu-se o contacto rádio, o que teve como consequência o não registo de dados pelo software e-mo-tion, o que impossibilitou, nesta zona, a recuperação da posição e orientação das fotografias. Para minimizar a probabilidade de ocorrência de choques ou danos durante a aterragem, a perda de altitude para a aterragem é realizada em espiral, caindo o aparelho aproximadamente no mesmo sítio onde foi largado.

Note-se na figura 2.5 uma parte de um círculo vermelho (canto inferior esquerdo

```
10:23:28 : Console log file successfully opened
10:23:28 : === New session : sex 11. Jan 10:23:28 2013 ===
10:23:29 : Robot created swinglet_cam_0
10:23:31 : Idle (running preflight checks)
10:23:44 : Idle (ready to take off)
10:24:41 : Log file swinglet_cam_0_0.log successfully opened.
10:24:41 : Taking off
10:24:49 : En route to home waypoint
10:25:07 : En route to waypoint 1
10:26:12 : En route to waypoint 2
10:26:14 : Taking photo #1
10:26:18 : Taking photo #2
10:26:22 : En route to waypoint 2
10:26:23 : Taking photo #3
10:26:26 : Taking photo #4
10:26:30 : Taking photo #5
10:26:35 : Taking photo #6
10:26:38 : Taking photo #7
10:26:42 : Taking photo #8
10:26:47 : Taking photo #9
10:26:50 : Taking photo #10
```

Figura 2.6: Extrato de um ficheiro *log* produzido pelo software e-mo-tion.

e canto inferior direito da figura) em redor do ponto de largada. Este círculo corresponde a uma área de segurança tal que, se por um qualquer motivo o avião sair do plano de voo pretendido (por exemplo, coordenadas mal atribuídas para o plano de voo), ele regressa imediatamente à base.

## 2.4 Produtos gerados pelo voo

### 2.4.1 Produtos gerados pelo software e-mo-tion

Tal como explicado anteriormente, uma das aplicações deste software é o registo de um conjunto de dados durante a realização do voo. Os dados registados são numerosos e, para além disso, muitos deles são de difícil interpretação para não especialistas, estando relacionados com o estado do aparelho, velocidade, posição, orientação, etc. Outro tipo de ficheiro é um ficheiro de texto destinado à utilização direta por parte do utilizador, contendo sobretudo os momentos de captação das fotografias e a identificação das fiadas percorridas, além de eventuais mensagens de erro (figura 2.6).

Ainda outro tipo de ficheiro produzido é um ficheiro kml que permite visualizar o trajeto do voo em *Google Earth* (figura 2.7).

### 2.4.2 Produtos gerados pelo software PostFlight Suite

Com base nos ficheiros de texto produzidos pelo software e-mo-tion durante o voo, a principal tarefa do Postflight Suite foi a de (provavelmente) proceder à interpolação da posição GPS do centro de projeção de cada fotografia por um lado e, por outro, de registar a informação produzida: a posição GPS (e outras informações),





Figura 2.7: Visualização em *google earth* do ficheiro kml com o traçado do voo gerado pelo software e-mo-tion.

```
#Rev: sensefly/geoinfo/2
fileName    latitude    longitude    altitude_amsl    altitude_wgs84    heading    pitch    roll
IMG_0178.JPG 38.9531164000 -7.6795903000 336.18 387.30 81.46 5.33 -2.43
IMG_0179.JPG 38.9530855000 -7.6793120000 338.27 390.12 109.72 5.40 -5.57
IMG_0180.JPG 38.9530550000 -7.6789901000 339.35 391.99 80.54 9.94 -1.48
IMG_0181.JPG 38.9530887000 -7.6786684000 336.87 389.30 80.71 6.94 0.67
IMG_0182.JPG 38.9530762000 -7.6783740000 337.41 390.46 96.91 5.52 -3.14
IMG_0183.JPG 38.9530630000 -7.6780598000 336.87 390.16 89.32 4.46 -4.84
IMG_0184.JPG 38.9530621000 -7.6777645000 337.01 389.01 88.64 4.41 -2.32
IMG_0185.JPG 38.9530677000 -7.6774722000 336.98 389.00 87.93 3.69 -4.08
IMG_0186.JPG 38.9530785000 -7.6771890000 336.71 388.88 90.43 3.38 -3.11
IMG_0187.JPG 38.9530769000 -7.6769019000 336.84 388.69 88.77 2.86 -3.81
IMG_0188.JPG 38.9530910000 -7.6766253000 336.28 387.73 81.90 3.33 -5.58
IMG_0189.JPG 38.9530716000 -7.6763717000 337.00 389.21 108.37 1.91 -3.66
IMG_0190.JPG 38.9530983000 -7.6759496000 339.20 389.96 63.91 9.28 2.89
IMG_0191.JPG 38.9531342000 -7.6756697000 338.54 389.35 84.77 6.60 -1.16
```

Figura 2.8: Extrato de um ficheiro de texto produzido pelo software Postflight Suite, com as posições e orientações aproximadas de cada imagem do voo realizado.

foram registadas no formato EXIF e foi gerado também um ficheiro de texto com as orientações e posições aproximadas (figura 2.8).

### 2.4.3 Produtos gerados pelo software Postflight Terra 3D

Tal como já foi dito anteriormente, o software Postflight Terra 3D é o software responsável pela realização do ajustamento por feixes perspetivos. Adicionalmente a cada ajustamento, são determinados os parâmetros de orientação interna da câmara (distância focal, coordenadas foto do ponto principal e as distorções radiais e tangenciais).

Neste processamento em concreto foram utilizados 10 pontos fotogramétricos, levantados previamente com a ajuda de um GPS de elevada precisão e que desenvolveremos mais pormenorizadamente no capítulo respetivo. A inclusão de PFs, para além de melhorar a exatidão dos produtos finais, determina também o sistema de coordenadas retangular a adotar e que no nosso caso foi o sistema ETRS89/PT-TM06.



Figura 2.9: Ortofotografia produzida pelo software Postflight Terra 3D.

```

imageWidth imageHeight focalLength[pixel] projectionCenterX[pixel] projectionCenterY[pixel] radialDist1 radialDist2 radialDist3 tan
4000 3000 2853.0831975216192 2032.8975119225579 1480.9056276918698 -0.042570743762352085 0.024274068583512151 -0.003914797372507971
imageName X Y Z Omega Phi Kappa
IMG_0178.JPG 39313.163035286154 -79299.520081338196 333.45594516697247 -2.2534431574611991 -5.178809831174819 -90.098090106000157
IMG_0179.JPG 39337.911434787638 -79303.240587310822 335.87332853960487 0.20858282278784238 -5.9439786002002579 -108.77694789289097
IMG_0180.JPG 39365.435255392535 -79305.534735069377 336.91010758699593 1.0528797316468947 -8.1373900200242648 -92.89847593224167
IMG_0181.JPG 39393.795243024186 -79301.582768776629 333.84838142867659 3.8787578731268431 -7.087583541304702 -95.57632212928998
IMG_0182.JPG 39420.688040793051 -79303.884351037123 334.07576972894742 0.46587039697889659 -5.8024885103425143 -102.89146489751055
IMG_0183.JPG 39446.565030912541 -79304.323616018344 333.95683074823069 -0.44579249204856902 -3.9692636240686068 -95.147230220406584
IMG_0184.JPG 39471.858303623165 -79304.221531360541 333.78984309706232 0.87965732372848737 -4.9630911439822425 -97.97882325180062
IMG_0185.JPG 39498.098182566289 -79303.019588224081 333.15087941017345 0.085332180803077709 -3.2037198785087537 -93.863880763996434
IMG_0186.JPG 39521.665937731195 -79302.139071847399 333.44145878835474 0.52131042513835046 -4.5646857557010065 -98.086192843206732
IMG_0187.JPG 39545.353548611303 -79302.488671905201 333.85734505281255 -1.4340214622075016 -1.8109308844084422 -97.125995990353218
IMG_0188.JPG 39568.894941025443 -79300.71353674939 332.69795671104811 -1.9799563177429484 -2.5345485904745928 -89.166103548578604
IMG_0189.JPG 39591.333206635027 -79303.113755917409 333.20299268843121 0.13853949444716898 -1.7443348319619945 -106.4910240158594
IMG_0191.JPG 39653.250291259421 -79295.364768674306 333.83401568783046 3.0809830636345441 -5.6742846610971309 -96.58720085854965
IMG_0192.JPG 39678.892142030629 -79298.972330727076 333.15680201043736 1.453676686523797 -5.1427693063855315 -96.814302363815678
IMG_0193.JPG 39705.670121687406 -79299.216192104475 332.75447478836708 1.0662618886151867 -4.6816494354057632 -86.137907653478322
IMG_0194.JPG 39731.033036973022 -79295.754781295414 334.96506288932602 -1.5632299531832983 -5.8593389150184843 -83.851006098352684
IMG_0195.JPG 39760.506517721529 -79290.641490061156 334.88902644086397 -2.2745469318966078 -4.70813646969521147 -84.621522736077679
IMG_0196.JPG 39789.725940191194 -79291.397673852523 333.03562618893989 -2.0591108440537131 -6.332419301827815 -98.918879907049046
IMG_0197.JPG 39822.059364213557 -79292.65371249638 335.68425687228279 -4.2306488544557448 -9.368364098762272 -98.787085297259154
IMG_0198.JPG 39852.797715785477 -79295.828068374103 335.30158571278446 0.2799376097789345 -10.286604906659733 -93.903921480444556
IMG_0199.JPG 39881.970539481685 -79295.747497690012 334.14968466774724 4.648694272841305 -7.6890292337870134 -94.277294471380571

```

Figura 2.10: Extrato de um ficheiro de texto produzido pelo software Postflight Terra 3D com as posições e orientações mais exatas de cada imagem (entre outros parâmetros).

Para além da ortofotografia (figura 2.9), os produtos gerados por este software são constituídos essencialmente por um conjunto de ficheiros de texto e ficheiros específicos para determinados softwares de fotogrametria, bem como um relatório que resume os principais resultados obtidos pelo ajustamento realizado. Os principais parâmetros e produtos obtidos são os seguintes (figura 2.10):

1. Parâmetros de orientação externa da câmara no momento de captação das imagens:

Coordenadas objeto do centro de projeção da câmara no sistema de referência escolhido (retangulares) e WGS84 (geodésicas);

Parâmetros *omega*, *phi* e *kappa*, relativos à orientação da câmara no espaço objeto.

2. Parâmetros de orientação interna da câmara:

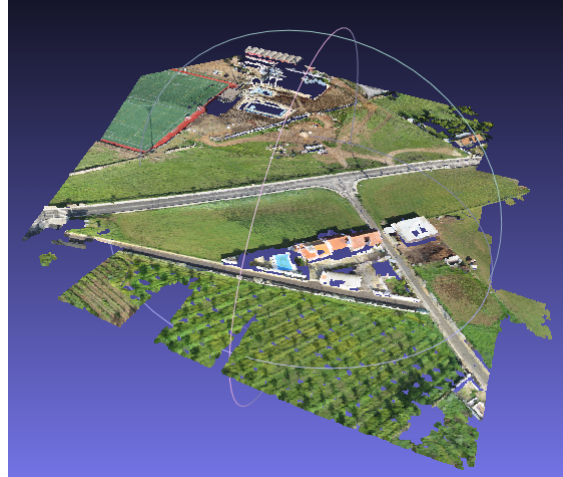


Figura 2.11: Visualização em Meshlab [22] de um extrato do ficheiro PLY produzido pelo software Postflight Terra 3D.

Tabela 2.1: Resumo das características do true-ortofoto automaticamente produzido.

N.º Imagens	Resolução espacial	Altura média de voo	Área	N.º de PFs
309	3cm/pixel	87.4 m	55.6 ha	10

Distância focal;

Coordenadas foto do ponto principal;

Parâmetros de distorção radial;

Parâmetros de distorção tangencial.

3. Nuvem de pontos cotados;

4. True-ortofoto.

Ainda um outro tipo de produto interessante produzido pelo software Postflight Terra 3D, é o ficheiro PLY [28]. No caso do presente trabalho, o ficheiro PLY mais não é do que uma lista de objetos correspondentes a pontos cotados com propriedades de cor associadas. Devido à elevada densidade de pontos produzidos pelo software, podemos assim ter uma primeira impressão do terreno a 3 dimensões (figura 2.11). O software Postflight Terra 3D produziu também um relatório contendo dados estatísticos relativos à recuperação da posição e orientação das imagens, bem como à qualidade do true-ortofoto e que iremos analisar em maior detalhe.

A tabela 2.1 resume alguns dos resultados obtidos.

Das 310 imagens que foram tiradas, apenas uma imagem localizada no canto sudoeste da ortofoto, foi descartada para a produção automática do ortomosaico,



Figura 2.12: Qualidade final do ortomosaico produzido. As zonas a vermelho indicam as áreas onde o ortomosaico e o MDS podem conter artefactos.

Tabela 2.2: Resumo do número de pontos homólogos e pontos de ligação utilizados para o ajustamento em bloco e erro médio de reprojeção dos pontos homólogos no espaço foto.

N.º total de pontos homólogos observados	1 313 803
para o ajustamento em bloco	
N.º total de pontos de ligação utilizados	551 227
para o ajustamento em bloco	
Erro médio de reprojeção	0.188727 [pixéis]

por falta de suficiente número de pontos homólogos, devido à já referida falha de comunicação rádio.

No relatório é apresentada uma imagem que identifica as regiões da ortofoto/MDS que têm uma elevada inclinação ou declive (linhas de quebra), que poderão explicar a ocorrência de artefactos nessas zonas (figura 2.12). Outro dos factos observados tem a ver com a quantidade de pontos homólogos e pontos de ligação usados para o ajustamento, bem como a estimativa do erro médio de reprojeção (tabela 2.2). Os 1 313 803 pontos homólogos observados para o ajustamento em bloco, correspondem a 551 227 pontos de ligação entre imagens. Por outro lado, verificamos que o erro médio de reprojeção apresentado é de cerca de  $1/5$  do tamanho de um pixel. Este erro médio de reprojeção é o erro que resulta do recálculo das coordenadas foto dos pontos homólogos que serviram de base ao cálculo das respetivas coordenadas dos pontos de ligação no espaço objeto, aplicando para o efeito as conhecidas equações de colinearidade, que relacionam entre si espaço foto e espaço objeto. O valor observado ( $1/5$  do tamanho de um pixel), pode-se considerar um bom valor, dado estar muito próximo do valor inicial.



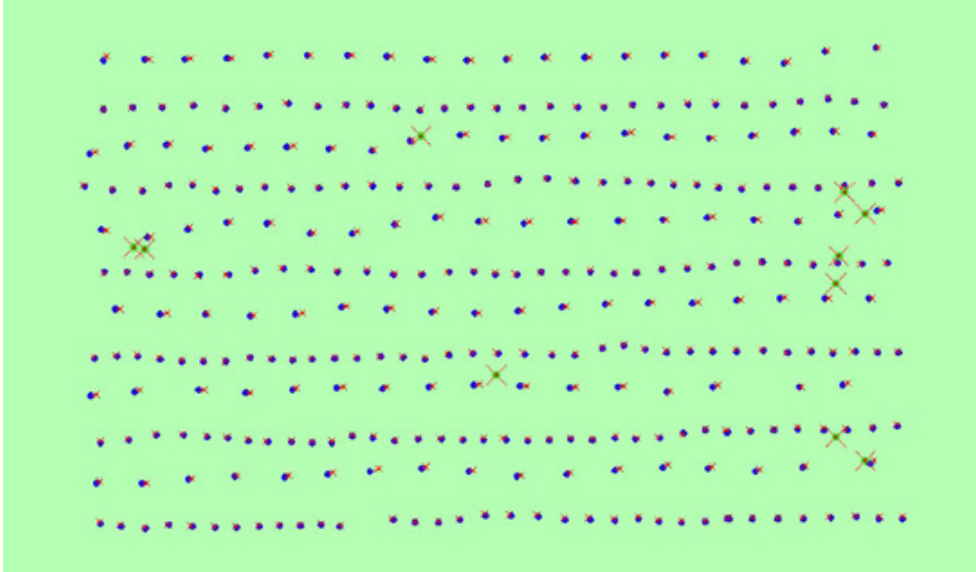


Figura 2.13: Desvio planimétrico entre as coordenadas GPS pré-ajustamento (pequenas cruces vermelhas) e as coordenadas GPS ajustadas (pequenos pontos a azul) dos centros de projeção da máquina no momento de captação das fotografias, bem como o desvio planimétrico entre os PFs (grandes cruces vermelhas) e as suas posições estimadas (grandes pontos verdes).

É produzido também um mapa com as fiadas realizadas, onde se evidenciam os resíduos planimétricos entre os pontos de tomada de foto pré e pós ajustamento (figura 2.13). As coordenadas GPS pré-ajustamento são as coordenadas GPS que são atribuídas a cada fotografia pelo software Postflight Suite e que provavelmente resultam de uma interpolação que tem em consideração os momentos do tempo de registo de cada fotografia e os momentos do tempo de registo das coordenadas GPS. Pela análise desta figura, verificam-se 2 factos de relevo:

1. Temos fiadas com mais fotografias registadas e fiadas com menos fotografias, dispondo-se estas de uma forma intercalada entre si;
2. Nas fiadas com menos fotografias verifica-se um maior desfasamento entre coordenadas GPS pré-ajustadas e coordenadas GPS ajustadas.

Não sabemos se este comportamento do UAV é planeado ou não (visto que nada existe escrito sobre isto), no entanto, é possível que seja um comportamento previsto e que o UAV tire mais fotografias nas fiadas em que consegue uma maior estabilização do avião e portanto um menor desfasamento entre coordenadas GPS pré e pós ajustadas, visto que esta ultima situação é de todo desejável. Desta forma o avião compensa as fiadas com menos fotografias com as fiadas adjacentes com mais fotografias, sempre tendo em atenção a sobreposição lateral e longitudinal desejada.

```

39336.40701 -79338.79425 256.1731873
39343.72403 -79338.78705 255.9234772
39356.22205 -79338.8457 256.1484985
39378.32324 -79338.86996 257.1962585
39565.41681 -79338.87933 270.9525757
40220.5654 -79338.80551 243.1920624
40222.46033 -79338.81674 243.3429718
40223.30524 -79338.76483 243.2917633
40235.84546 -79338.76474 242.9245148
39347.0798 -79338.7345 256.0437927
39351.50168 -79338.62823 256.5934143
39366.41687 -79338.61035 257.4074402
39370.73868 -79338.66333 256.5698853
39434.54233 -79338.72348 260.8234558
39565.50632 -79338.69809 270.9325867
40129.23178 -79338.71805 253.1908569
40203.17566 -79338.63461 244.3212891
40222.89279 -79338.64401 243.3242493
39337.5054 -79338.49252 256.0626221
39341.10062 -79338.58966 255.9634094
39360.49136 -79338.54782 256.2475281
39431.9108 -79338.5589 260.2496033
39453.35461 -79338.4415 261.52005
39565.20625 -79338.58984 270.8884583

```

Figura 2.14: Extrato do ficheiro de texto com a nuvem de pontos cotados (formato M,P,H), no sistema de coordenadas ETRS89/PT-TM06.

Por exemplo, pode acontecer que o avião tenha mais facilidade em estabilizar quando voa contra o sentido do vento e que esse facto lhe permita calcular com alguma antecedência (e portanto com mais exatidão) os pontos de tomada de fotos, de forma a cumprir, tanto quanto possível, a percentagem desejada de sobreposição.

A nuvem de pontos cotados (figura 2.14) a que já anteriormente fizemos referência, foi gerada pelo software Postflight Terra 3D, após a realização do ajustamento por feixes perspetivos. Esta nuvem materializou-se num ficheiro de texto contendo 12 410 013 pontos (*sousel\_norte\_dem\_geo.txt*) com coordenadas no formato M,P,H e sistema de coordenadas do projeto (ETRS89/PT-TM06). Esta quantidade de pontos equivale a uma densidade de 22.3 pontos cotados por  $m^2$ , tendo em consideração a área de ortofotografia de 55.6 ha.



## Capítulo 3

# Apoio Fotogramétrico

Neste estudo, a atividade de apoio fotogramétrico compreende todas as operações de campo e de gabinete que visam determinar com precisão as coordenadas objeto dos pontos de apoio fotogramétrico mas também as coordenadas objeto dos pontos de controlo posicional.

Se o GPS que equipa o UAV tivesse uma precisão elevada (na ordem de grandeza dos centímetros), não seria necessário qualquer ponto de apoio fotogramétrico. No entanto o GPS tem erros na ordem de grandeza dos metros e tal facto obriga-nos a recorrer a pontos de apoio fotogramétrico, tendo em atenção o fim em vista que é a georreferenciação das fotografias obtidas. Por outro lado, necessitamos também de pontos de controlo posicional para aferir a qualidade dos subprodutos e produtos finais da cadeia de produção cartográfica. Pelos motivos expostos foi necessário realizar trabalho de campo de apoio fotogramétrico.

Para a coordenação de pontos na área de estudo foi utilizado um GPS da marca Leica [17], modelo 1200 com leitura de fase L1/L2 e código C/A. O sistema de coordenadas do projeto é o ETRS89/PT-TM06.

Na coordenação de PFs existiu uma preocupação de localizar os PFs nos cantos e centro do bloco, não existindo preocupação em seguir uma metodologia convencional de distribuição de PFs. A metodologia convencional estipula que deve existir um PF duplo em cada canto do bloco, um PF de 3 em 3 modelos ao longo da primeira e da ultima fiada e, finalmente, um PF de 3 em 3 modelos em todas as zonas de sobreposição lateral [31]. Para além da própria empresa afirmar ser necessário apenas a inclusão de alguns pontos fotogramétricos para melhorar a exatidão posicional do bloco [15], ficaria extremamente dispendioso senão mesmo impossível nalguns casos, cumprir a metodologia convencional, porque a área dos modelos é muito pequena, porque temos muitos modelos num bloco também ele com uma área muito inferior a um bloco convencional e não necessariamente o mesmo número de modelos em cada



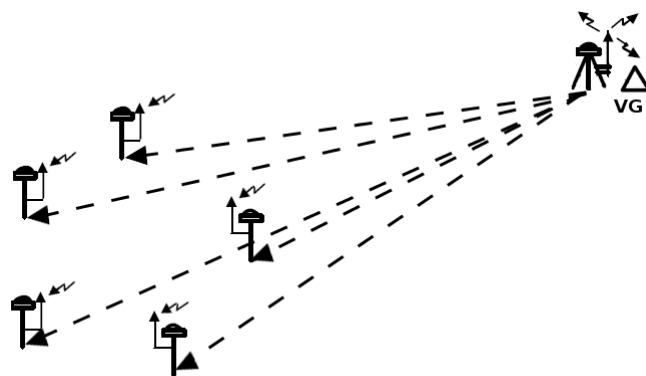


Figura 3.1: Metodologia adotada de posicionamento em modo base-RTK (comunicações rádio) e estação de referência posicionada num vértice geodésico (VG) próximo (adaptado de [1]).

fiada e entre fiadas.

Os trabalhos de campo foram realizados em 2 momentos distintos do tempo: Um primeiro momento aconteceu no dia do voo (11 de Janeiro de 2013) e um segundo momento aconteceu a 23 e 24 de Maio seguintes.

### 3.1 Posicionamento em modo base-RTK clássico

Este trabalho de posicionamento decorreu no dia 11 de Janeiro, tendo como objetivo principal a coordenação de alguns PFs para o imediato processamento do voo.

Para este trabalho em concreto, trabalhou-se apenas em modo base-RTK (figura 3.1), estacionando o fixo no geodésico Bazonas, de 3<sup>a</sup> ordem, situado aproximadamente a 2 km da área de estudo (ver figura 2.3). A posição ETRS89/PT-TM06 deste geodésico foi observada localmente pela DGT [9]. A escolha deste método de posicionamento deveu-se essencialmente à sua rapidez de execução sem pôr em causa as precisões pretendidas para este trabalho. O modo base-RTK proporciona uma precisão centimétrica [21] mais do que suficiente para as precisões exigidas pela DGT para a planimetria digital do MNT [10]. Neste dia foram coordenados 20 pontos, tendo apenas 10 destes 20 pontos sido utilizados como pontos de apoio fotogramétrico no primeiro processamento realizado.

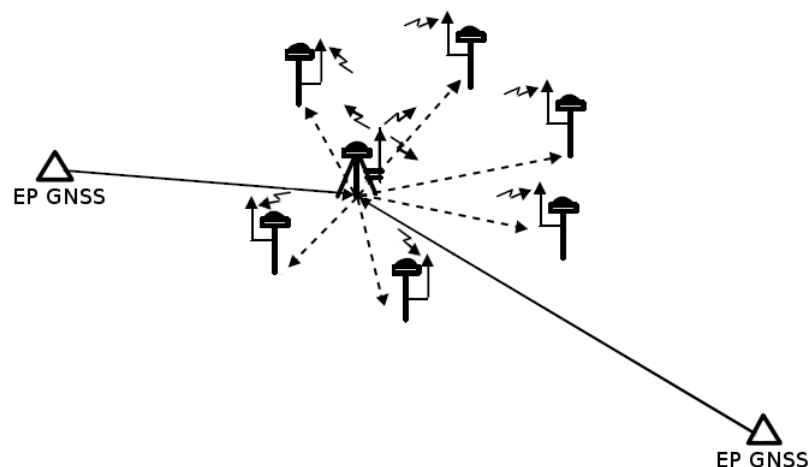


Figura 3.2: Metodologia adotada de posicionamento em modo base-RTK (comunicações rádio) e posicionamento estático-relativo da estação de referência (adaptado de [1]).

### 3.2 Posicionamento em modo base-RTK e rede RENEP

Para além de pretendermos testar a qualidade posicional da ortofotografia em função do número de PFs, pretendíamos também obter pontos de controlo posicional que tinham sido levantados em número reduzido no dia do voo. Para este efeito, foi realizado um novo levantamento posicional da área de estudo nos dias 23 e 24 de Maio de 2013, com o objetivo de se obter uma quantidade desejável de pontos de controlo e pontos fotogramétricos que cobrissem tão uniformemente quanto possível toda esta área.

Visto que da primeira vez tínhamos sentido dificuldades de comunicação rádio nalgumas zonas da área de estudo e também porque precisávamos de um ajudante para tomar conta da estação de referência, decidimos desta vez adotar uma metodologia ligeiramente diferente da metodologia inicial (figura 3.2):

1. Modo base-RTK, com a estação de referência colocada dentro da área de estudo (no topo do edifício da Câmara Municipal de Sousel) e com coordenadas aproximadas na fase de medição dos pontos;
2. Modo estático – relativo, para posicionamento preciso da estação de referência. Para este efeito recorreremos ao serviço de Pós-Processamento da Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS da DGT (rede RENEP).

Nestes dois dias de trabalho de campo foram levantados 141 pontos (143 pontos se contarmos com as estações de referência usadas em cada dia) por toda a área



Figura 3.3: Localização da estação de referência, no topo do edifício da Câmara Municipal de Sousel.



Figura 3.4: Pormenor do trabalho de medição de um ponto de controlo/fotogramétrico em modo base-RTK.

de estudo com uma precisão média de 1.8 cm (sigma 3D). Apesar de a maioria dos pontos terem sido levantados ao nível do solo, alguns pontos houve que foram coordenados em estruturas elevadas, como terraços, coberturas e torres de edifícios.

Em cada um dos dias a estação de referência esteve cerca de 6 horas a fazer leituras a uma taxa de 5 segundos, com o objetivo principal de resolver as ambiguidades de ciclo mas também de reduzir os possíveis efeitos do multitrajeto e ruído do recetor [21]. Houve também a preocupação de medir sempre a altura da antena, de modo a termos as coordenadas reduzidas ao ponto no solo.

As figuras 3.3 e 3.4 ilustram, respetivamente, a localização da estação de referência e a medição de um ponto de controlo.

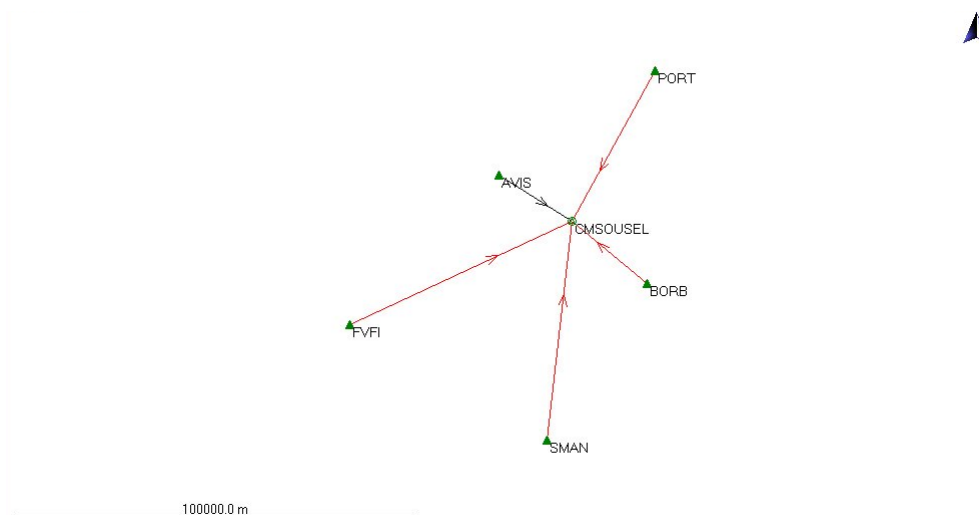


Figura 3.5: Pormenor dos vetores resultantes do ajustamento da estação de referência a partir das estações RENEP de Avis, Borba, Portalegre, São Manços e FVFI.

Após a realização dos trabalhos de campo, foram realizados em gabinete os trabalhos de pós-processamento, que consistiram na determinação precisa da posição da estação de referência, com base num ajustamento efetuado a partir de 5 estações RENEP (Avis, Portalegre, Borba, São Manços e Foros de Vale de Figueira) vizinhas à área de estudo (figura 3.5). O software utilizado para este processamento foi o Leica Geo Office 8.3 [17].

Por último, depois de determinadas com precisão as coordenadas da estação de referência, foi feita a correção das coordenadas RTK dos PFs e PCs medidos a partir desta estação.



## Capítulo 4

# Georreferenciação direta

A obtenção das relações geométricas existentes entre os objetos do mundo real (representados num qualquer sistema de referência) e a imagem desses mesmos objetos (representados num plano imagem), é conhecida por *georreferenciação* [16]. As relações geométricas referidas são possíveis de serem determinadas se conhecermos os parâmetros de orientação interna (OI) e externa (OE) do sensor remoto no momento de captação das imagens. A orientação externa de um sensor remoto (ou sensor imagem) compreende 2 conceitos:

1. Posição do centro de projeção do sensor remoto num qualquer sistema de referência ligado ao objeto;
2. Orientação (ou atitude) do sensor remoto também num qualquer sistema de referência ligado ao objeto.

Por seu lado, a georreferenciação pode ainda ser obtida por dois modos:

1. Georreferenciação direta;
2. Georreferenciação indireta.

Da bibliografia lida e/ou consultada, não se encontrou uma definição clara e inequívoca sobre estes conceitos. De qualquer modo, propomos uma definição muito próxima daquela que é avançada por Perry [27] mas na linha da definição anterior de georreferenciação: *Georreferenciação direta* é o processo independente de recuperação da geometria existente entre os objetos do mundo real (representados por um qualquer sistema de referência) e a imagem desses mesmos objetos (representados por um plano imagem) resultante da integração do sensor remoto e dos sistemas de navegação associados. Esta definição dá ênfase a 3 requisitos fundamentais de um sistema de georreferenciação direta:

1. Processo independente: Funciona nesta definição como sinónimo de “direto” ou “autónomo” e pretende realçar o facto de que este método não necessita de informação externa (pontos fotogramétricos, por exemplo) para proceder à georreferenciação;
2. Recuperação da geometria: Esta componente da definição pretende destacar que o objetivo deste e de qualquer método de georreferenciação é o de “recuperar” ou “reaver” algo ou alguma coisa que ocorreu no passado e que neste caso é a geometria que existiu entre os objetos representados no sistema objeto e os mesmos objetos representados no plano imagem, nesse referido momento do tempo;
3. Integração do sensor remoto e dos sistemas de navegação: Para que este sistema seja verdadeiramente independente é necessário conhecer a orientação externa do sensor no momento em que a imagem foi captada e, para isso, é necessário integrar o sensor remoto com os sistemas de navegação associados *i.e.*, o sistema inercial de navegação INS (para a determinação da orientação absoluta do sensor) e o sistema de navegação GPS (para determinação da posição do sensor).

Naturalmente, a *georreferenciação indireta* (por contraposição a georreferenciação direta) é todo o processo de georreferenciação que necessita de informação externa ao sistema para proceder à recuperação da geometria entre plano imagem e sistema objeto. Incluem-se aqui os métodos clássicos de georreferenciação, como a interseção inversa espacial (no caso de uma única imagem) e a aerotriangulação e ajustamento por feixes perspetivos (no caso de estarem disponíveis imagens com sobreposição e pontos fotogramétricos) [39]. Depois de serem conhecidos os parâmetros de orientação externa das imagens, os elementos existentes no espaço objeto podem ser restituídos a partir dos elementos existentes no espaço imagem. Esta restituição corresponde a uma interpolação entre PFs, no caso de uma georreferenciação indireta, e a uma extrapolação do sensor para o espaço objeto, no caso de uma georreferenciação direta [16]. Assim sendo, a georreferenciação direta é especialmente sensível à propagação de erros sistemáticos, especialmente em altimetria [16]. Se o UAV em estudo está equipado com um sistema GPS/IMU e nos fornece a posição do centro de projeção do sensor imagem por um lado, e a orientação por outro, poderíamos ser levados a pensar que temos já a relação geométrica pretendida entre o espaço imagem e espaço objeto. No entanto, esta relação geométrica *per si* de pouco nos serve, porque as coordenadas do centro de projeção do espaço imagem estão no sistema ECEF de referência global WGS84 (no caso do presente estudo), enquanto

que a atitude do sistema inercial refere-se aos ângulos formados entre o seu sistema de eixos 3D e um sistema plano de referência que é tangente ao elipsóide e perpendicular ao fio de prumo que passa no centro de projeção do plano imagem. Para além do incómodo de termos um sistema plano de referência para cada imagem, a cartografia e os produtos dela derivados que nos interessam obter (*e.g.* MDE, ortofotografias) são normalmente referentes a um sistema projetado de referência nacional. Interessa por isso proceder ao cálculo da OE de todas as imagens num sistema único projetado de referência (*e.g.* ETRS89/PT-TM06). Impõe-se neste momento uma pergunta: sabendo que a atitude do sistema inercial tem erros na ordem de graus e sabendo que o ajustamento por feixes perspetivos realizado pelo Postflight Terra 3D nos fornece com elevada precisão a atitude do sensor imagem no sistema de referência projetado que se deseja, então porquê proceder ao cálculo destes valores sabendo que nunca serão tão precisos como os valores calculados pelo ajustamento da Sensefly? A resposta afigura-se-nos natural: por um lado é um sistema bastante atrativo em termos de custos computacionais comparativamente a um ajustamento, o que nos permite, por exemplo, ter rapidamente uma ideia da área de território efetivamente coberta pelo UAV; por outro lado poderá servir como um passo preliminar para processamentos mais morosos em qualquer software de fotogrametria mas, acima de tudo, porque é uma oportunidade de aprender (mais do que isso, apreender) os conceitos subjacentes a esta componente da fotogrametria. Outras razões poderiam aqui ser invocadas, como razões de ordem económica, já que sendo o software de ajustamento da Sensefly tão dispendioso (mais dispendioso do que o próprio UAV), poderíamos talvez desta forma ultrapassar a sua aquisição. No entanto as razões anteriormente mencionadas parecem-nos as mais interessantes.

Existem atualmente diversas metodologias de georreferenciação direta. Para o presente estudo, estudámos 3 metodologias, que têm como características principais, as seguintes:

1. Método de Baumker [5]: Este método utiliza uma matriz de compensação para atenuar os efeitos causados pela curvatura da Terra e pela convergência de meridianos no sistema de referência projetado de destino. Por outro lado, o sistema local de referência é calculado para todo o bloco e não individualmente para cada imagem. Por último este método apenas calcula a georreferenciação direta para sistemas de referência projetados UTM.
2. Método de Legat [16]: É também utilizada uma matriz de compensação mas apenas para a convergência de meridianos. O sistema local de referência é individual para cada imagem contudo, é possível efetuar os cálculos de georreferenciação direta para qualquer sistema de coordenadas projetado;



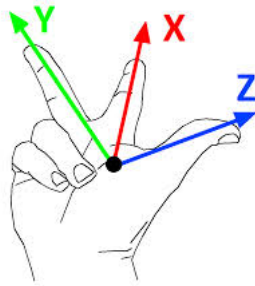


Figura 4.1: Regra dos sistemas de mão direita (fonte: [32]).

3. Método de Zhao [40]: Contrariamente aos outros 2 métodos anteriores, este método não utiliza uma matriz de compensação mas antes uma transformação de coordenadas. No entanto, tal como o método de Legat, é possível calcular os ângulos de orientação para qualquer sistema de coordenadas projetado.

Visto que pretendemos proceder ao cálculo da georreferenciação direta para o sistema projetado de referência oficial do Continente Português (ETRS89/PT-TM06, EPSG 3763), sobra-nos o método de Legat e o método de Zhao. Como o método de Legat já está mais testado e amadurecido e também porque os resultados obtidos pelo método de Zhao foram semelhantes aos resultados obtidos pelo método de Legat, vamos adotar neste estudo o método de Legat.

## 4.1 Considerações prévias

### Sistema de referência e convenções adotadas

A tabela 4.1 lista todos os sistemas de referência utilizados no presente estudo. Todos os sistemas de referência usados são sistemas de mão direita. Tal significa que se o polegar da mão direita (eixo  $zz$ ) apontar para cima, o dedo médio (eixo  $yy$ ) aponta para a esquerda do plano formado pelo polegar e o indicador (eixo  $xx$ ) (figura 4.1). No sistema de mão esquerda e nas mesmas condições anteriores, o dedo médio aponta para a direita.

Por outro lado, em fotogrametria, os sistemas de referência podem ser de 2 tipos: NED e ENU. NED, significa que o eixo  $xx$  (*North*) do sistema de referência aponta para Norte, o eixo  $yy$  (*East*) aponta para Este e o eixo  $zz$  aponta para baixo (*Down*). No sistema ENU de referência, o eixo  $xx$  aponta para Este (*East*), o eixo  $yy$  aponta para Norte (*North*) e o eixo  $zz$  aponta para cima (*Up*).

Para evitar confusões entre quantidades referentes ao datum global (SR  $e$ ) e quantidades referentes ao datum nacional (SR  $n$ ), usar-se-á uma barra horizontal

Tabela 4.1: Sistemas de referência utilizados

Sistema de referência (SR)	id	Descrição
SR local global	$l$	Sistema tangente ao elipsóide global (WGS84) (NED)
SR local nacional	$\bar{l}$	Sistema tangente ao elipsóide nacional (GRS80) (NED)
SR tangente auxiliar	$l'$	Os respectivos eixos são paralelos à projeção nacional mas os sentidos não (NED)
SR do corpo do avião	$b$	Realizado pelo conjunto dos 3 acelerómetros do INS (NED)
SR da câmara	$c$	Definido pelos eixos principais da câmara ou sensor imagem (ENU)
SR ECEF	$e$	Datum global (e.g., WGS84)
SR EF	$n$	Datum nacional (e.g., ETRS89)
SR da projeção nacional	$p$	Projeção nacional (TM06) (ENU)

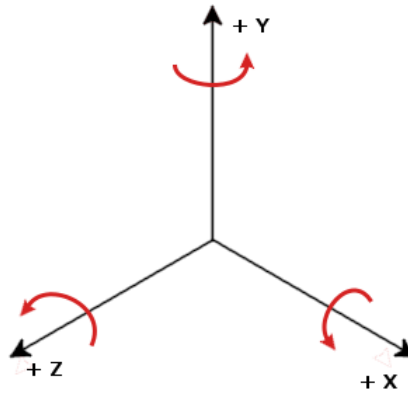


Figura 4.2: Sentidos positivos de rotação dos eixos de um sistema cartesiano.

por cima da letra da quantidade no caso do SR  $n$  (Ex.:  $\bar{\phi}$ ,  $\bar{\lambda}$ , no caso da latitude e longitude referentes ao datum nacional, respetivamente).

A altitude referida neste capítulo será sempre a altitude elipsoidal ( $h$ ).

Por convenção, são consideradas positivas as rotações contrárias ao sentido do movimento dos ponteiros do relógio quando observadas do exterior e olhando contra o sentido positivo do eixo em torno do qual se está a rodar (figura 4.2).

Todo o desenvolvimento deste capítulo está pensado para sensores remotos passivos (como câmara óticas, por exemplo), contrariamente a sensores ativos (como *scanners* laser, por exemplo).

### Correções a considerar

A transformação dos parâmetros de OE requerem correções a fazer que estão relacionadas com a curvatura da Terra e com o facto de que um elipsóide não pode ser projetado no plano sem ocorrerem distorções nos comprimentos. Estas correções são apenas uma aproximação à realidade, sendo por esse motivo que Legat designa este seu método de georreferenciação direta como *georreferenciação direta aproximada*. A curvatura da Terra induz dois tipos de distorções nas imagens [16]: a *distorção radial* e a *distorção vertical*. A correção da distorção radial é já uma correção clássica, que tem por objetivo corrigir radialmente as coordenadas obtidas da imagem. A distorção em altura é mais significativa no caso da georreferenciação direta do que na indireta, devido ao carácter extrapolativo do próprio método [16]. Estas correções não são feitas durante a transformação dos parâmetros de OE mas sim numa fase posterior, pelo que não serão consideradas no presente estudo.

A correção das distorções nos comprimentos dos eixos do SR projetado, está diretamente relacionada com o tipo de projeção que, no caso português (projeção TM06), é uma projeção cilíndrica transversa de *Gauss-Krüger* (GK), também conhecida por projeção *Transversa de Mercator* (TM). Trata-se de uma projeção conforme, significando tal facto que a projeção das linhas ortogonais do elipsóide de referência (meridianos e paralelos) mantêm-se também ortogonais no plano projetado ou, por outras palavras, que os ângulos retos entre os eixos são preservados na projeção.

Uma das consequências da projeção conforme é aquilo a que se designa por *convergência de meridianos* ( $\gamma$ ): é o ângulo formado pelo eixo do norte do mapa e pelo eixo do norte verdadeiro (ou linha do meridiano que passa nesse ponto). O ângulo é tanto maior quanto mais afastado o ponto estiver do meridiano central, sendo também dependente da latitude do lugar. Como iremos ver, esta correção tem um papel importante para o cálculo dos ângulos de orientação do sensor imagem. A fórmula utilizada para o cálculo foi a seguinte [16]:

$$\gamma(\bar{\phi}, \bar{l}) = \bar{l} \sin \bar{\phi} + (\bar{l}^3/3) \sin \bar{\phi} \cos^2 \bar{\phi} (1 + 3 \bar{e}'^2 \cos^2 \bar{\phi}) \quad (4.1)$$

onde,

$$\begin{cases} \bar{e}'^2 = (\bar{a}^2 - \bar{b}^2)/\bar{b}^2 \\ \bar{l} = \bar{\lambda}_{CP} - \bar{\lambda}_{GK} \end{cases}$$

sendo  $\bar{e}'^2$  a segunda excentricidade do elipsóide nacional e  $\bar{l}$  a separação entre o meridiano que passa no centro de projeção (CP) do sensor imagem e o meridiano central da projeção *Gauss-Krüger* nacional.

Outra das consequências da projeção conforme e, em concreto, das distorções nos

comprimentos dos seus eixos, está relacionada com o facto de que um SR projetado não é na realidade um sistema cartesiano “puro”. Mesmo sendo os seus eixos ortogonais entre si, existem diferentes fatores de escala para as coordenadas planimétricas e altimétricas. Enquanto que a escala planimétrica depende da posição do ponto (a escala planimétrica aumenta com a crescente separação do meridiano central), a escala vertical é constante e normalmente igual a 1. O método de Legat que estamos a seguir utiliza esta correção somente para diminuir a distorção em altura dos pontos terreno que se pretendem estimar, pelo que esta correção não será igualmente considerada no presente estudo.

## 4.2 Transformações

Os sistemas de referência e os ângulos de navegação (*roll*, *pitch* e *heading*) não coincidem com os sistemas de referência e os ângulos (*omega*, *phi* e *kappa*) utilizados em fotogrametria. Desta forma é necessário realizar um conjunto de transformações entre os 2 sistemas. Como parâmetros iniciais teremos as coordenadas do centro de projeção de cada imagem dadas pelo GPS incorporado no UAV (*i.e.* no SR global WGS84) e os ângulos *roll*, *pitch* e *heading* dadas pelo sistema inercial IMU. Como parâmetros finais pretendem-se as coordenadas de cada centro de projeção no SR projetado nacional (*i.e.*, ETRS89/PT-TM06), bem como os ângulos *omega*, *phi* e *kappa*, que são os ângulos formados pelos eixos do SR projetado nacional e os eixos do sensor imagem. Em notação matemática, o sistema GPS/INS dá-nos ao início e para cada imagem, as coordenadas do centro de projeção no SR global,  $\mathbf{x}_{CP}^e$  e os elementos *roll*, *pitch* e *heading* da matriz de atitude,  $\mathbf{R}_b^l$ , que nos permitem transformar um vetor do SR  $b$  (índice inferior da matriz  $\mathbf{R}$ ) localizado no CP, para um vetor localizado no SR  $l$  (índice superior da matriz  $\mathbf{R}$ ). No final teremos as coordenadas do centro de projeção no datum nacional  $n$  ( $\mathbf{x}_{CP}^n$ ) e os elementos *omega*, *phi* e *kappa* retirados da matriz de atitude,  $\mathbf{R}_p^c$ . Finalmente, partiremos do pressuposto de que o sensor imagem está alinhado com o corpo do avião (que é dado pelo sistema inercial IMU). Na realidade existe um pequeno desalinhamento entre ambos os sistemas que, em bom rigor, deveria ser tido em consideração. Para além dos valores do desalinhamento não serem dados pela Sensefly, o IMU regista erros na ordem dos graus, pelo que poderemos desprezar o pequeno desalinhamento existente.

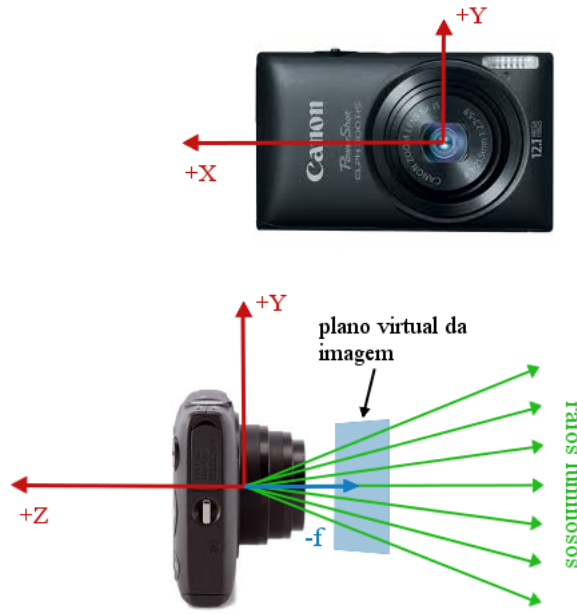


Figura 4.3: Sistema de referência do sensor imagem.  $f$ , distância focal. (adaptado de [27]).

### Rotação entre o SR do sensor imagem e o SR do corpo do avião, $R_c^b$

Desprezando os desalinhamentos existentes entre ambos os sistemas, os ângulos formados pelos eixos de ambos dependerão, como em qualquer rotação, da definição dos respectivos eixos e de como os sistemas se encontram orientados entre si. Enquanto que as definições dos eixos nos sistemas de referência de navegação estão bem definidos (por força dos *standards* de aeronáutica), o mesmo já não se passa em fotogrametria [5]. À falta de mais informação, partiremos do princípio que a disposição dos eixos na câmara são como seguem na figura 4.3.

Considerando a disposição da câmara fotográfica no corpo do avião e os eixos de referência de ambos os sistemas, a rotação entre o SR  $c$  e o SR  $b$ , é como se segue na figura 4.4.

Os elementos da matriz de rotação espacial entre quaisquer dois sistemas que têm a mesma origem mas cujos eixos estão rodados de determinados ângulos entre si, são dados pelos cosenos das rotações entre os eixos de ambos [31].

Tendo em consideração a matriz de rotação espacial entre quaisquer dois sistemas e a orientação dos eixos dos sistemas  $c$  e  $b$  conforme figura anterior, a matriz de rotação  $R_c^b$  é dada por:

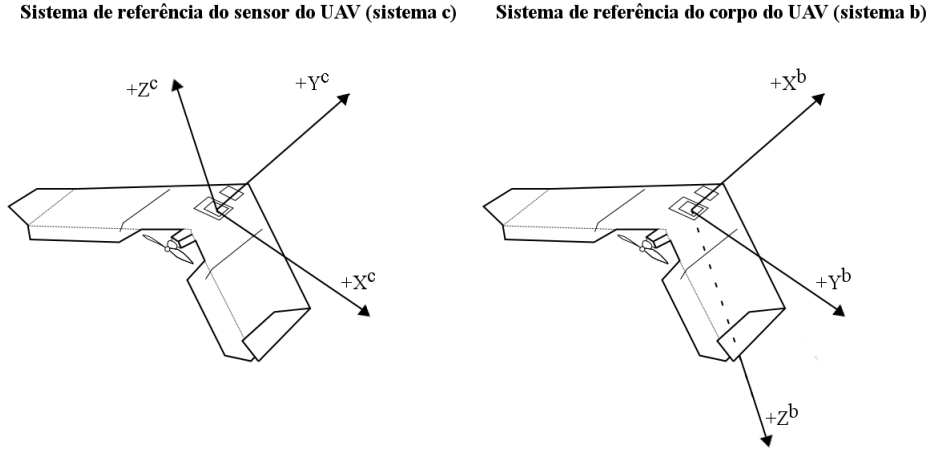


Figura 4.4: Disposição do SR do sensor imagem (sistema  $c$ , do tipo ENU) no corpo do avião (sistema  $b$ , do tipo NED).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_c^b &= \begin{bmatrix} \cos(x^c x^b) & \cos(y^c x^b) & \cos(z^c x^b) \\ \cos(x^c y^b) & \cos(y^c y^b) & \cos(z^c y^b) \\ \cos(x^c z^b) & \cos(y^c z^b) & \cos(z^c z^b) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{2}) & \cos(0) & \cos(\frac{\pi}{2}) \\ \cos(0) & \cos(-\frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2}) \\ \cos(\frac{\pi}{2}) & \cos(-\frac{\pi}{2}) & \cos(\pi) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

### Rotação entre o SR do corpo do avião e SR local global, $\mathbf{R}_b^l$

Tal como já anteriormente dito, o SR local global corresponde ao plano tangente ao elipsóide ECEF e perpendicular à projeção do fio de prumo que passa no centro de projeção de cada imagem. Existe, por isso, um SR local global para cada imagem.

Os ângulos desta matriz de rotação correspondem, na realidade, a três rotações dos ângulos de *Euler*, continuamente atualizados pelos três giroscópios que compõem o sistema inercial IMU do UAV (*roll* :  $\phi$ , *pitch* :  $\theta$ , *heading* :  $\psi$ ).

Os ângulos *roll*, *pitch* e *heading* são usados para transformar um vetor do SR do corpo do avião para o SR local global (também conhecido por SR de navegação) e vice-versa. A matriz de rotação é por sua vez calculada a partir da multiplicação de 3 matrizes de rotação, pela ordem seguinte: 1ª rotação em torno do eixo dos  $xx$ ,

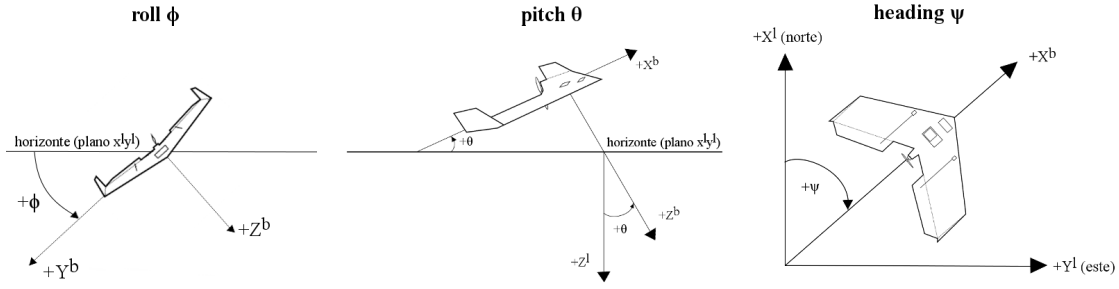


Figura 4.5: Definição dos ângulos de rotação de *Euler*  $\phi, \theta, \psi$ .

dada pelo ângulo *roll*; 2ª rotação em torno do eixo dos  $yy$ , dada pelo ângulo *pitch* e, finalmente, a 3ª e última rotação em torno do eixo dos  $zz$ , dada pelo ângulo *heading* (ou *yaw*). O resultado é a seguinte matriz quadrada 3x3:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_b^l &= \mathbf{R}_z(\psi) \cdot \mathbf{R}_y(\theta) \cdot \mathbf{R}_x(\phi) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Uma propriedade útil das matrizes de rotação é que a sua matriz inversa é igual à sua matriz transposta [31], pelo que se quisermos transformar um vetor do SR local global para o SR do corpo do avião podemos calcular a inversa ou a transposta da matriz anterior.

### Rotação entre o SR local global e o SR ECEF, $\mathbf{R}_l^e$

No caso do presente estudo, o SR ECEF corresponde ao SR WGS84, visto que é o SR usado pelo GPS incorporado no UAV.

Para transformarmos um vetor com o mesmo ponto de aplicação, do SR local global para o SR ECEF, teremos de o multiplicar pela matriz de rotação  $\mathbf{R}_l^e$ . A matriz de rotação inversa  $\mathbf{R}_e^l$ , é dada por:

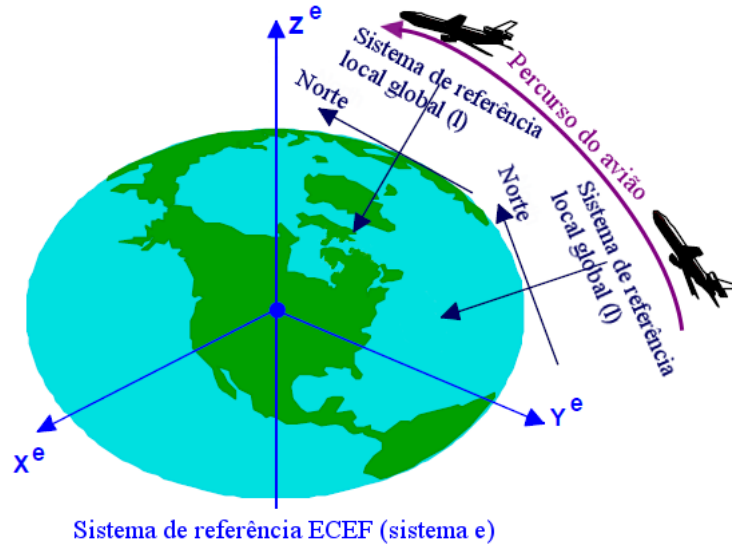


Figura 4.6: Relação entre o SR local global e o SR ECEF (adaptado de [5]).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_e^l &= \mathbf{R}_y\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \mathbf{R}_z(\lambda) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\phi + \frac{\pi}{2}) & 0 & \sin(\phi + \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi + \frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(\phi + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -\sin \phi \cos \lambda & \sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \phi \cos \lambda & \cos \phi \sin \lambda & -\sin \phi \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Finalmente,

$$\mathbf{R}_l^e = (\mathbf{R}_e^l)^{-1} \tag{4.5}$$

### Rotação entre o SR ECEF e o SR EF nacional, $\mathbf{R}_e^n$

Esta rotação corresponde a uma rotação entre *data*, do datum global para o datum nacional (*i.e.* ETRS89, no caso do presente estudo). No entanto, esta rotação tem implicações mais profundas do que aparentam à primeira vista: os próprios parâmetros de OE da câmara deverão ser alterados de forma a comportar o novo datum nacional. Falamos, portanto, de uma transformação de datum: por um lado, a posição do vetor global  $\mathbf{x}_{CP}^e$  deve ser transformada para o vetor nacional  $\mathbf{x}_{CP}^n$  e, por outro, a própria mudança de datum também afeta a orientação espacial do referencial local  $l$  [16] já que, normalmente, os *data* nacionais não são *data* geocêntricos mas



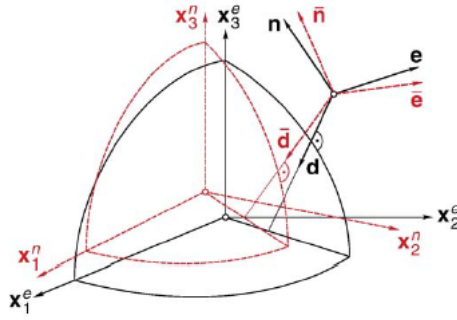


Figura 4.7: Alteração do plano tangente ao elipsóide devido à mudança de datum (fonte: [16]).

sim *data* mais ajustados à componente nacional do geóide. Deste modo, o referencial local  $l$  tangente ao elipsóide ECEF, deverá ser rodado de forma a ficar tangente ao elipsóide nacional, passando a designar-se por  $\bar{l}$  (figura 4.7).

Devido ao facto de os valores das rotações em jogo serem muito pequenos, a respetiva matriz de rotação está muito próxima da matriz identidade  $I$ . Com os erros envolvidos na ordem de grandeza de graus, poderíamos considerar a matriz identidade como matriz de rotação sem incorrer num erro que tenha impacto significativo no resultado final. Apesar de tudo, decidimos calcular esta matriz apenas com fins meramente didáticos. Naturalmente o primeiro desafio foi obter os parâmetros de rotação entre os dois *data*. Infelizmente, da pesquisa efetuada não encontrámos parâmetros diretos para realizar esta rotação. Sabemos no entanto que o referencial WGS84 está alinhado com o referencial ITRF com uma exatidão na ordem de alguns centímetros (Virgílio Mendes, comunicação pessoal), pelo que decidimos usar este referencial como referencial de partida para o cálculo das rotações entre os *data* em análise. Resta saber qual a realização do ITRF a usar na transformação para ETRF2000 (O EUREF TWG recomenda a adoção do referencial ETRF2000 à época 2000.0 como o referencial convencional do sistema de referência ETRS89 [3]). Um dos últimos desenvolvimentos no referencial WGS84 é uma atualização baseada no ITRF2008 (WGS84(G1674)) (Virgílio Mendes, comunicação pessoal). Como o voo foi realizado numa data posterior (G1722), decidimos usar a realização ITRF2008 por considerarmos que é a realização mais alinhada com o referencial WGS84, no presente caso. Por último, resta assinalar que o erro de centímetros entre os dois referenciais é perfeitamente aceitável para os nossos trabalhos visto que as coordenadas GPS dos centros de projeção com que estamos a trabalhar têm erros de posicionamento na ordem de grandeza do metro.

Desta forma, a matriz de rotação  $\mathbf{R}_e^n$ , é dada por:

$$\mathbf{R}_e^n = \begin{bmatrix} 1 & -R_{Z_{08,00}} & R_{Y_{08,00}} \\ R_{Z_{08,00}} & 1 & -R_{X_{08,00}} \\ -R_{Y_{08,00}} & R_{X_{08,00}} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

O reposicionamento do centro de projeção da câmara pode ser obtido através de uma transformação de Helmert (ou transformação de 7 parâmetros). Para este efeito a metodologia seguida foi a seguinte [23]:

1. Conversão direta das coordenadas geodésicas em coordenadas cartesianas tridimensionais, dentro do datum ECEF.

$$\begin{cases} X_{CP}^e = (N + h) \cdot \cos\phi \cdot \cos\lambda \\ Y_{CP}^e = (N + h) \cdot \cos\phi \cdot \sin\lambda \\ Z_{CP}^e = [(1 - e^2) \cdot N + h] \cdot \sin\phi \end{cases} \quad (4.7)$$

sendo,

$(X_{CP}^e, Y_{CP}^e, Z_{CP}^e)$  as coordenadas cartesianas tridimensionais do centro de projeção no SR ECEF (vetor  $\mathbf{x}_{CP}^e$ );

$(\phi, \lambda, h)$  as coordenadas geodésicas do centro de projeção no SR ECEF, *i.e.*, a latitude, a longitude e a altitude elipsoidal, respetivamente;

$e^2$  é um parâmetro característico do elipsóide do SR ECEF;

$N$  é a grande normal à latitude  $\phi$ , definida do seguinte modo:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2\phi}}$$

2. Transformação de Helmert entre coordenadas cartesianas tridimensionais do datum ECEF para o datum EF nacional.

$$\mathbf{x}_{CP}^n = \mathbf{x}_{0,e}^n + \mu_e^n \cdot \mathbf{R}_e^n \cdot \mathbf{x}_{CP}^e \quad (4.8)$$

sendo,

$\mathbf{x}_{CP}^n$  o vetor de coordenadas cartesianas tridimensionais do centro de projeção no SR EF nacional;

$\mathbf{x}_{0,e}^n$  o vetor de translação entre a origem do SR ECEF e a origem do SR EF nacional;

$\mu_e^n$  o fator de escala entre os dois *data*;

$\mathbf{R}_e^n$  a matriz de rotação entre o *datum* ECEF e o *datum* EF nacional;

$\mathbf{x}_{CP}^e$  o vetor de coordenadas cartesianas tridimensionais do centro de projeção no SR ECEF.

A fórmula genérica de Bursa-Wolf<sup>1</sup> utilizada foi:

$$\begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1 + \alpha) \cdot \begin{bmatrix} 1 & -R_Z & R_Y \\ R_Z & 1 & -R_X \\ -R_Y & R_X & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

3. Conversão inversa de coordenadas cartesianas tridimensionais em coordenadas geodésicas, dentro do datum EF (*e.g.* ETRS89).

Esta conversão é realizada recorrendo a um processo iterativo, dado que o valor da altitude elipsoidal vai depender do valor da latitude do centro de projeção da câmara.

$$\begin{cases} \bar{\phi} = \arctan\left(\frac{\bar{Z} + \bar{e}^2 \cdot \bar{N} \cdot \sin \bar{\phi}}{\bar{P}}\right) \\ \bar{\lambda} = \arctan\left(\frac{\bar{Y}}{\bar{X}}\right) \\ \bar{h} = \frac{\bar{P}}{\cos \bar{\phi}} - \bar{N} \end{cases} \quad (4.10)$$

onde,

$$\begin{cases} \bar{N} = \frac{\bar{a}}{\sqrt{1 - \bar{e}^2 \cdot \sin^2 \bar{\phi}}} \\ \bar{P} = \sqrt{\bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \end{cases}$$

Como valor inicial aproximado de  $\bar{\phi}$  podemos tomar o seguinte valor:

$$\bar{\phi}_{ap} = \arctan\left(\frac{\bar{Z}}{\bar{P} \cdot (1 - \bar{e}^2)}\right)$$

Procede-se ao cálculo de  $\bar{\phi}$  até que  $\bar{\phi}_i - \bar{\phi}_{i-1} \leq$  precisão desejada (no presente estudo considerámos a precisão de  $10^{-10}$ ). Por último, no final do processo iterativo, determina-se o valor da altitude elipsoidal  $\bar{h}$ .

### **Rotação entre o SR EF nacional e o SR local nacional, $\mathbf{R}_n^l$**

Esta rotação corresponde a uma rotação entre o referencial cartesiano tridimensional do datum nacional e o referencial plano tangente ao respetivo elipsóide e perpendicular ao nadir do centro de projeção. Naturalmente vai existir uma matriz de rotação por cada imagem do bloco.

<sup>1</sup>O formato matricial da transformação de Helmert é designado por *fórmula de Bursa-Wolf*

Esta rotação corresponde à rotação inversa da rotação  $\mathbf{R}_l^e$  mas, desta vez, entre um SR EF (e não ECEF) e um SR local nacional (e não global). A matriz de rotação  $\mathbf{R}_n^{\bar{l}}$  é dada como se segue:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_n^{\bar{l}} &= \mathbf{R}_y(\bar{\phi} + \frac{\pi}{2}) \cdot \mathbf{R}_z(\bar{\lambda}) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\bar{\phi} + \frac{\pi}{2}) & 0 & \sin(\bar{\phi} + \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\bar{\phi} + \frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(\bar{\phi} + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \bar{\lambda} & -\sin \bar{\lambda} & 0 \\ -\sin \bar{\lambda} & \cos \bar{\lambda} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -\sin \bar{\phi} \cos \bar{\lambda} & \sin \bar{\phi} \sin \bar{\lambda} & \cos \bar{\phi} \\ -\sin \bar{\lambda} & \cos \bar{\lambda} & 0 \\ -\cos \bar{\phi} \cos \bar{\lambda} & \cos \bar{\phi} \sin \bar{\lambda} & -\sin \bar{\phi} \end{bmatrix} \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

### Rotação entre o SR local nacional e o SR tangente auxiliar, $\mathbf{R}_l^{l'}$

O SR local nacional é um SR tangente ao elipsóide nacional e com origem na interseção do elipsóide com a linha normal que passa no centro de projeção da imagem. Por outro lado, os seus eixos têm uma orientação do tipo NED: o eixo dos xx aponta para o norte geográfico (segundo a direção das linhas dos meridianos), o eixo dos yy aponta para leste (segundo a direção das linhas dos paralelos) e o eixo do zz aponta para baixo. Como o nosso destino final é o SR projetado nacional (visto que é em relação a este sistema que queremos conhecer os ângulos de rotação das imagens), então os eixos (x,y) dos dois sistemas sofrem de um desvio entre si que é tanto maior quanto maior a distância entre eles, *i.e.*, a *convergência de meridianos* ( $\gamma$ ). Esta correção é realizada introduzindo um novo sistema cartesiano auxiliar também do tipo NED ( $l'$ ) no mesmo ponto origem do SR local nacional mas cujos eixos estão alinhados com os eixos do mapa (ou SR projetado) (figura 4.8). Desta forma os sistemas cartesianos auxiliares  $l'$  (um por cada imagem) proporcionam um tipo de aproximação discreta ao sistema projetado não cartesiano [16].

Esta rotação corresponde a uma rotação em torno do eixo zz do SR  $\bar{l}$  na quantidade  $\gamma$  mas de sentido contrário. A respetiva matriz  $\mathbf{R}_l^{l'}$  é dada por:

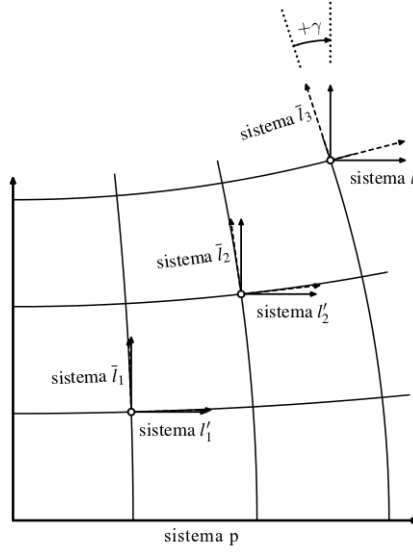


Figura 4.8: Exemplo da componente planimétrica de 3 SR locais nacionais  $\bar{l}$  e 3 SR tangentes auxiliares  $l'$  e relação com o SR projetado  $p$ , bem como exemplo da convergência de meridianos  $\gamma$  (adaptado de [16]).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_{\bar{l}}^{l'} &= \mathbf{R}_{Z, \bar{l}}^{l'}(-\gamma_{PC}) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(-\gamma_{PC}) & -\sin(-\gamma_{PC}) & 0 \\ \sin(-\gamma_{PC}) & \cos(-\gamma_{PC}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\gamma_{PC}) & \sin(\gamma_{PC}) & 0 \\ -\sin(\gamma_{PC}) & \cos(\gamma_{PC}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

#### Rotação entre o SR tangente auxiliar e o SR nacional projetado, $\mathbf{R}_{l'}^p$

Chegamos finalmente ao SR projetado nacional de destino. Esta rotação final resulta do facto de os tipos dos sistemas de referência em causa terem uma diferente orientação do seus eixos: o SR do mapa é do tipo ENU enquanto o SR auxiliar é do tipo NED. Desta forma, esta rotação envolve apenas trocar no sistema auxiliar o primeiro e o segundo eixo entre si e inverter o terceiro, tal como se segue:

$$\mathbf{R}_{l'}^p = \mathbf{R}_{NED}^{ENU} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

Combinando todas as matrizes de rotação apresentadas, a matriz de rotação

entre o SR imagem e o SR projetado nacional apresenta-se da seguinte forma:

$$\mathbf{R}_c^p(\omega, \phi, \kappa) = \mathbf{R}_{l'}^p \cdot \mathbf{R}_l^{l'} \cdot \mathbf{R}_n^{\bar{l}} \cdot \mathbf{R}_e^n \cdot \mathbf{R}_l^e \cdot \mathbf{R}_b^l \cdot \mathbf{R}_c^b \quad (4.14)$$

Como os ângulos  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$  são medidos a partir do SR projetado para o SR da imagem, teremos ainda de transpor a matriz:

$$\mathbf{R}_p^c(\omega, \phi, \kappa) = [\mathbf{R}_c^p(\omega, \phi, \kappa)]^T \quad (4.15)$$

Portanto, para cada imagem do bloco em estudo, terá de ser calculada a matriz  $\mathbf{R}_p^c(\omega, \phi, \kappa)$  a partir da qual, num último passo, deverão ser derivados os ângulos  $\omega, \phi, \kappa$ .

Antes destes ângulos serem derivados é necessário saber a respetiva ordem de multiplicação na matriz final, visto que a multiplicação de matrizes não é uma operação comutativa. Existem diferentes ordens de rotação para diferentes sistemas fotogramétricos de ajustamento. Apesar da ordem de rotação não ser divulgada pela Sensefly, dos testes realizados concluímos que a ordem de rotação mais provável é a ordem utilizada pelo sistema BLUH de ajustamento. Deste modo a matriz final apresenta-se como se segue:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_p^c &= \mathbf{R}_z(\kappa) \cdot \mathbf{R}_x(\omega) \cdot \mathbf{R}_y(\phi) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \kappa \cos \phi + \sin \kappa \sin \omega \sin \phi & \sin \kappa \cos \omega & -\cos \kappa \sin \phi + \sin \kappa \sin \omega \cos \phi \\ -\sin \kappa \cos \phi + \cos \kappa \sin \omega \sin \phi & \cos \kappa \cos \omega & \sin \kappa \sin \phi + \cos \kappa \sin \omega \cos \phi \\ \cos \omega \sin \phi & -\sin \omega & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Por último, deduzimos os ângulos de rotação ( $\omega, \phi, \kappa$ ) a partir dos elementos da matriz  $R_{ij}$  ( $i$  linha,  $j$  coluna), tal como se segue:

$$\begin{cases} \phi = \arctan \frac{R_{31}}{R_{33}} \\ \omega = \arcsin(-R_{32}) \\ \kappa = \arctan \frac{R_{12}}{R_{22}} \end{cases} \quad (4.17)$$

Tabela 4.2: Resumo dos resultados obtidos para o cálculo da posição dos centros de projeção em ETRS89/PT-TM06.

Parâmetro	S/transf. [m]	C/transf. [m]	$\Delta_{EMQ}$ [m]	Erro [%]
$EMQ_M$	3.210	3.157	0.053	1.65
$EMQ_P$	1.400	1.201	0.199	14.2
$EMQ_{MP}$	3.502	3.378	0.124	3.54

### 4.3 Resultados obtidos

Todo o processamento foi realizado em software MatLab [19]. Foram calculadas as coordenadas geodésicas dos centros de projeção no datum nacional e os ângulos de rotação omega, phi e kappa para as 309 fotografias do projeto. De modo a aferir-se a exatidão do modelo seguido, as posições e os ângulos calculados foram comparados com os valores mais exatos determinados pela Sensefly e que resultaram de um ajustamento por feixes perspetivos.

As posições dos centros de projeção originais (WGS84) e transformadas (ETRS89) foram comparadas com as posições ajustadas, mais exatas, dos centros de projeção (ETRS89/PT-TM06). Para este efeito, as coordenadas originais WGS84 dos centros de projeção foram consideradas como sendo coordenadas ETRS89 e, tanto estas como as transformadas foram convertidas para coordenadas planas TM06, usando para este efeito a aplicação WebTransCoord da DGT [38]. Os resultados obtidos encontram-se descritos na tabela 4.2.

Pela análise desta tabela podemos verificar que a transformação de datum trouxe uma melhoria na ordem de grandeza dos centímetros no reposicionamento dos centros de projeção. No entanto a melhoria verificada é muito pequena comparativamente ao erro devido à má qualidade do GPS incorporado no UAV, na ordem de grandeza dos metros. Por exemplo, em planimetria, podemos verificar que esta melhoria corresponde apenas a 3.5% do erro de posicionamento existente, pelo que a necessidade de realizar um ajustamento é essencial caso se pretenda gerar outros produtos derivados em ambiente de fotogrametria.

Os cálculos das rotações foram realizados com ângulos compreendidos no intervalo  $[-\pi, \pi]$ . Para se determinar a menor diferença entre os ângulos medidos e os ângulos mais exatos, foram convertidos para o círculo completo  $[0^\circ, 360^\circ]$  todos os valores dos ângulos e calculada a menor diferença entre eles. Os resultados obtidos para os sistemas BLUH e PATB encontram-se descritos nas tabelas 4.3 e 4.4, respetivamente.

Tabela 4.3: Resumo dos resultados obtidos para a matriz de rotação BLUH.

Parâmetro	$\Delta\omega^\circ$	$\Delta\phi^\circ$	$\Delta\kappa^\circ$
Máximo	8.6943	8.1740	20.0461
Média	2.6386	1.3448	7.7785
Mínimo	0.0016	0.0017	0.1216
<b>EMQ</b>	<b>3.1685</b>	<b>1.8127</b>	<b>8.6723</b>

Tabela 4.4: Resumo dos resultados obtidos para a matriz de rotação PATB.

Parâmetro	$\Delta\omega^\circ$	$\Delta\phi^\circ$	$\Delta\kappa^\circ$
Máximo	16.5316	19.8606	179.9155
Média	5.0557	6.3485	167.6658
Mínimo	0.0869	0.0045	127.4800
<b>EMQ</b>	<b>5.9685</b>	<b>7.1300</b>	<b>167.9832</b>

Pelos resultados presentes nestas tabelas, podemos verificar que o EMQ é consideravelmente menor no sistema BLUH do que no sistema PATB, especialmente na rotação em torno do eixo  $zz$  do SR imagem ( $\kappa$ ), pelo que presumimos que será a matriz de rotação BLUH a matriz adotada pela Sensefly. Por outro lado, os EMQs de  $\Delta\omega$  e  $\Delta\phi$  obtidos para BLUH são consideravelmente melhores do que as diferenças de  $3^\circ - 5^\circ$  referidas por Küng, 2011 [15]. Em sentido contrário, o valor obtido de  $8.7^\circ$  para  $\Delta\kappa$  está acima do intervalo de valores referido por este autor. Contudo, o valor elevado de  $\kappa$  não é de todo anormal já que estando intimamente relacionado com o valor de *heading*, este tem sido desde há longo tempo referido como um ângulo de orientação de elevada incerteza em sistemas deste tipo [14], sendo inclusive considerado a principal fonte de erro na determinação da atitude de pequenos UAVs como o do presente estudo [24].

Por último, em ambiente Photomod, voltámos a criar um projeto de georreferenciação direta composto pelas 38 fotografias do sub-bloco escolhido, com os parâmetros de posição e orientação calculados por nós. Cota ortométrica fornecida pelo voo. O resultado é o que se apresenta na figura 4.9. Para efeitos de comparação visual, apresenta-se também a figura 4.10 referente ao bloco devidamente ajustado.

## 4.4 Sumário e conclusões

O objetivo de se compreender a integração entre o posicionamento e orientação do aparelho em navegação e o posicionamento e orientação do aparelho em fotogrametria, foi atingido.





Figura 4.9: Imagem da georreferenciação direta do sub-bloco montado em ambiente Photomod com os parâmetros de posição e orientação calculados.



Figura 4.10: Imagem do sub-bloco montado em ambiente Photomod com os parâmetros de posição e orientação ajustados.

Os resultados obtidos permitem-nos obter de uma forma rápida, uma aproximação grosseira da realidade, contudo, em pequenos UAVs como este equipados com sistemas GPS/INS de fraca qualidade, dificilmente se conseguirão melhores aproximações. No entanto, a metodologia poderá tornar-se mais interessante se for possível melhorar uma das várias fontes de erro do sistema: a qualidade do sistema GPS (por exemplo, pela possibilidade de utilização de GPS diferencial); a qualidade do sistema INS; a melhoria da incerteza associada ao *heading*; a integração nesta fase da correção dos erros devidos à curvatura da Terra e à distorção dos eixos do

SR projetado e o conhecimento do desalinhamento entre sensor imagem e corpo do UAV.

Para uma amostra constituída por 309 imagens, os resultados obtidos de EMQ de  $3.2^\circ$  e  $1.8^\circ$  para  $\Delta\omega$ ,  $\Delta\phi$ , respetivamente, revelaram-se melhores do que o previsto em [15]. Comparativamente a  $\Delta\omega$  e  $\Delta\phi$ , o valor mais elevado de  $\Delta\kappa$  corresponde à maior incerteza associada a este ângulo [14] [24].

Se a projeção em causa for cilíndrica transversa de *Gauss-Krüger* é possível conhecerem-se os parâmetros de orientação externa para qualquer sistema de referência projetado, mesmo não conhecendo os parâmetros de transformação entre os 2 data (partindo do pressuposto de que a matriz de transformação é próxima da matriz identidade e que a magnitude dos restantes erros é muito superior ao erro desta suposição).



## Capítulo 5

# Análise do Modelo Digital de Superfície

Um dos produtos gerados pelo software Postflight Terra 3D é uma nuvem de pontos cotados, irregularmente distribuídos, que permitirá gerar o modelo digital de superfície através da criação de uma rede irregular de triângulos, usando para o efeito um qualquer método de triangulação. Posteriormente, o modelo digital de terreno (MDT) poderá ser obtido pela eliminação dos pontos localizados acima do solo.

Que seja do nosso conhecimento, não existe publicamente nada documentado pela DGT quanto às precisões e exatidões do MDS. O mais próximo que existe é a exatidão exigida para o Modelo Numérico Altimétrico (MNA) sob a forma de uma grelha de pontos cotados [10]. O MNA resulta de uma interpolação do MDT e não do MDS. Faz sentido controlar posicionalmente o MNA quando este é utilizado na produção das ortofotografias ou mesmo tratando-se de um produto final da cadeia de produção cartográfica, no entanto temos algumas dúvidas na necessidade de gerar este produto visto que o MDT pode ser diretamente utilizado em todas as aplicações do MNA e de uma forma mais eficaz, já que se elimina o erro posicional associado ao cálculo da grelha de pontos a partir do MDT. O custo computacional maior para interpolar a partir do TIN é cada vez menos importante face à crescente capacidade dos processadores.

Contrariamente à fotogrametria clássica em que é o MDT que serve de base à ortorretificação, no caso da tecnologia que se apresenta neste trabalho é o MDS e, por este facto decidimos controlá-lo em termos posicionais.

De seguida, a questão colocada foi: qual o método mais exato para realizar este controlo posicional?

A resposta pareceu-nos óbvia mas pouco exequível: tomar uma amostra significativa e aleatória de pontos da nuvem e, com o auxílio de métodos precisos de

posicionamento ir ao terreno e realizar a implantação dos pontos, aferindo desta forma o desvio entre a cota do ponto da nuvem e a cota do mesmo ponto determinada por métodos de grande precisão. Não sendo uma tarefa de todo impossível, nalguns casos, é certamente uma tarefa desnecessária devido à elevada densidade de pontos da nuvem (uma média de 22.3 pontos cotados/ $m^2$ ). Resulta assim que a cota de pontos de controlo pode ser aferida através da realização de métodos de interpolação, realizada diretamente a partir dos pontos da nuvem. A interpolação mais não é do que a estimação do valor da medida de uma determinada posição arbitrária com base nos valores das medidas de posições próximas conhecidas. No presente caso pretendemos estimar a cota dos pontos de controlo (que ocupam determinadas posições no plano x,y) a partir das cotas de pontos da nuvem que resultaram do processo de aerotriangulação automática. Trata-se portanto, de uma interpolação a 2 dimensões: a partir do plano x,y (variáveis independentes) vamos determinar a cota z (variável dependente).

Estando assente que a metodologia a seguir se basearia numa interpolação, a questão que se nos colocou a seguir foi: qual o método a utilizar? A diferença entre os vários métodos determinísticos de interpolação que existem está na escolha dos pontos da nuvem a partir dos quais se fará a interpolação. Aparentemente a DGT utiliza o IDW (*inverse distance weighting*) (João Marnoto, comunicação pessoal). Como nos interessa utilizar o método que nos garanta a melhor exatidão decidimos testar os métodos disponíveis pelas seguintes aplicações: MatLab (método do vizinho mais próximo e método linear); aplicação desenvolvida por João Marnoto, da empresa SINFIC S.A. (método do IDW e método do “melhor triângulo”) e, finalmente, aplicação ncontrol, desenvolvida por João Dinis, da FCUL (método dos vizinhos naturais). Todos estes métodos se baseiam na distância entre o ponto a interpolar e os pontos da nuvem mais próximos.

Parte-se do princípio de que os pontos da nuvem foram medidos todos da mesma forma e que por isso têm igual precisão, caso contrário os métodos que de alguma forma ponderam inversamente esta distância deveriam de ter também em consideração a precisão da medição.

Apesar do MatLab ter também o método dos vizinhos naturais, decidimos usar a aplicação ncontrol, pelo simples facto de o algoritmo ser mais eficiente do que o algoritmo do MatLab (porque corre numa máquina com processador *dual core*, com 1.66 GHz e 3 GB de RAM e o MatLab não corre). Por outro lado, tanto na aplicação desenvolvida por João Marnoto como na aplicação ncontrol desenvolvida por João Dinis, temos acesso a mais informação (nomeadamente os pontos da nuvem que contribuíram para o cálculo da cota de cada ponto interpolado e respetivos pesos).

Apesar do nosso propósito não ser o estudo aprofundado de cada um destes métodos, explicaremos muito sumariamente cada um deles:

1. Vizinho mais próximo

Trata-se do método mais simples de todos: a cota do ponto a determinar irá assumir a cota do ponto da nuvem que se encontra mais próximo deste. Este método está disponível no MatLab.

2. Linear

Este método está também disponível no MatLab. Ao aplicar este método, o software começa por construir a rede de triângulos de Delaunay a partir da nuvem de pontos, escolhendo de seguida o triângulo que envolve o ponto cuja cota pretendemos interpolar e cujos vértices são constituídos por pontos da nuvem. A partir daqui, determina-se a cota do ponto de controlo a partir das cotas conhecidas dos 3 pontos que constituem o triângulo, usando para o efeito a resolução de um polinómio de grau 1. Várias abordagens podem ser seguidas para aplicar o método linear de interpolação. Não sabemos qual a abordagem utilizada pelo MatLab, exemplificaremos, no entanto, com uma das abordagens mais simples com fins meramente ilustrativos (figura 5.1), fazendo uso do teorema de Tales <sup>1</sup> e ponderando inversamente a distância entre os pontos de cotas conhecidas ao ponto de controlo cuja cota se pretende estimar:

1º Interpola-se a cota ao longo do segmento de reta  $P_1P_2$  para se encontrar a cota do ponto  $P_a$

$$\begin{aligned}
 Z_a &= Z_1 - (Z_1 - Z_a) \\
 &= Z_1 - \left[ Z_1 - \left( Z_1 \cdot \frac{y_c - y_2}{y_1 - y_2} + Z_2 \cdot \frac{y_1 - y_c}{y_1 - y_2} \right) \right] \\
 &= Z_1 - \left[ Z_1 \cdot \left( 1 - \frac{y_c - y_2}{y_1 - y_2} \right) - Z_2 \cdot \frac{y_1 - y_c}{y_1 - y_2} \right] \\
 &= Z_1 - \left[ (Z_1 - Z_2) \cdot \frac{y_1 - y_c}{y_1 - y_2} \right]
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

2º Interpola-se a cota ao longo do segmento de reta  $P_1P_3$  para se encontrar a cota do ponto  $P_b$

$$Z_b = Z_1 - \left[ (Z_1 - Z_3) \cdot \frac{y_1 - y_c}{y_1 - y_3} \right] \tag{5.2}$$

---

<sup>1</sup>O teorema de Tales estipula que um feixe de retas paralelas determina sobre duas transversais quaisquer, segmentos proporcionais.

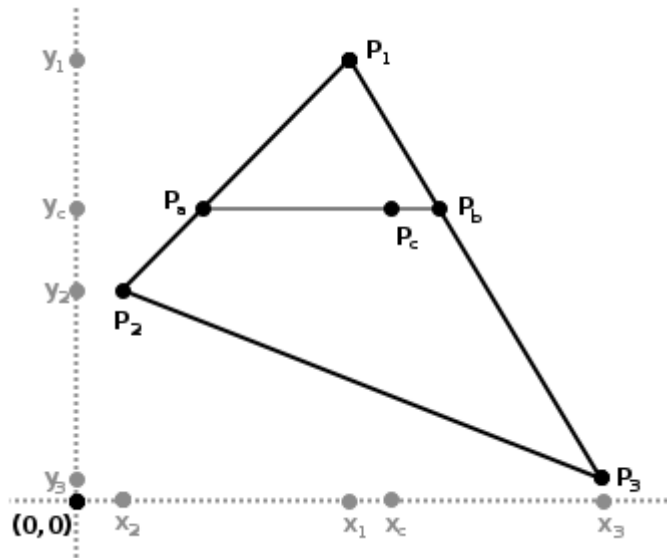


Figura 5.1: Uma possível abordagem para aplicação do método de interpolação linear ao ponto de controle  $P_c$ , a partir de um triângulo envolvente.

3º Finalmente, interpola-se a cota ao longo do segmento de reta  $P_aP_b$  para se encontrar a cota do ponto de controle  $P_c$

$$Z_c = Z_b - \left[ (Z_b - Z_a) \cdot \frac{x_b - x_c}{x_b - x_a} \right] \quad (5.3)$$

No entanto, o método acima apresentado não é, certamente, o método linear de interpolação mais eficiente. Um dos métodos lineares de interpolação mais eficientes e que não corre o risco de ter uma solução indeterminada (por não ter um denominador que possa ser zero, como no exemplo acima apresentado), baseia-se na utilização do sistema de coordenadas baricêntricas: em geometria, o sistema de coordenadas baricêntricas aplicado a um triângulo, é um sistema em que a localização de um ponto é especificada como o centro de massa (ou baricentro) de massas colocadas nos seus vértices [12]. No âmbito do contexto geométrico que nos interessa, o triângulo, as coordenadas baricêntricas são também conhecidas como *areal coordinates* ou ainda *area coordinates* (em terminologia inglesa), porque as coordenadas de  $P$  (figura 5.2) em relação ao triângulo  $A_1A_2A_3$  são proporcionais às áreas dos triângulos  $PA_1A_2$ ,  $PA_1A_3$  e  $PA_2A_3$  [2].

Na figura 5.2, as coordenadas baricêntricas correspondem às áreas dos triângulos  $PA_1A_2$ ,  $PA_1A_3$  e  $PA_2A_3$  normalizadas pela área do triângulo original  $A_1A_2A_3$ .

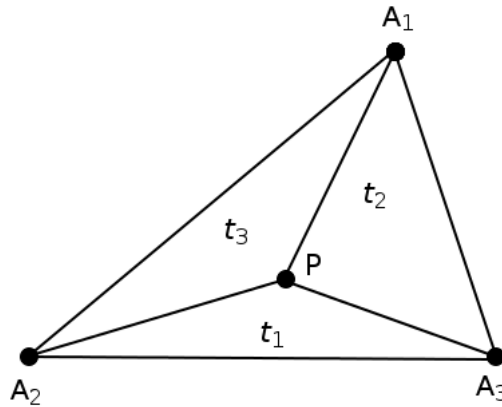


Figura 5.2: Coordenadas baricêntricas ( $t_1, t_2, t_3$ ) normalizadas do ponto P.

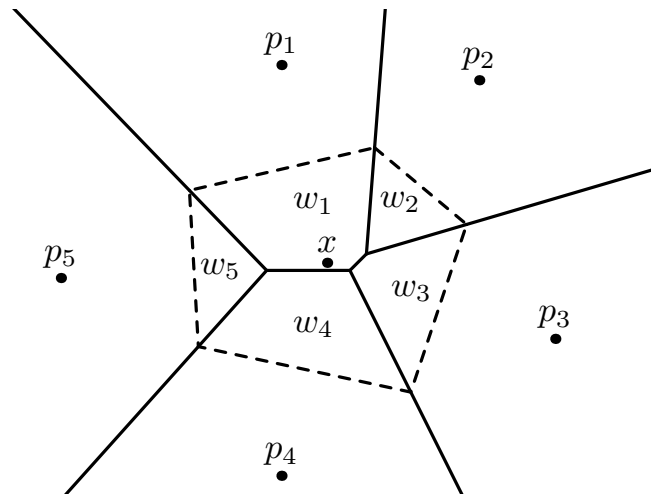


Figura 5.3: Interpolação por vizinhos naturais. Vizinhos naturais  $p_1, \dots, p_5$  e respectivos pesos  $w_1, \dots, w_5$ . Traço contínuo: diagrama de Voronoi; traço descontínuo: Área “roubada” ao diagrama de Voronoi existente, pela introdução do ponto  $x$ . Cortesia de João Dinis.

Pelo exposto acima vem que:  $t_1 + t_2 + t_3 = 1$

Assim sendo, a cota do ponto  $P(Z_p)$  é uma média ponderada com a seguinte forma:

$$Z_p = t_1 \cdot Z_1 + t_2 \cdot Z_2 + t_3 \cdot Z_3$$

Sendo  $Z_1, Z_2$  e  $Z_3$  as cotas dos pontos  $A_1, A_2$  e  $A_3$ , respetivamente.

### 3. Vizinhos naturais

De todos os métodos em estudo este é, talvez, o mais complexo por potencialmente envolver mais pontos da nuvem: o ponto de controlo a interpolar é



inserido no diagrama de Voronoi na respetiva posição  $x, y$  e, ao fazer-se isto, é gerado um novo polígono cuja área é ganha à custa da redução dos polígonos de Voronoi vizinhos (figura 5.3). Os pontos da nuvem cuja área dos polígonos foi reduzida são os vizinhos naturais do ponto a interpolar. O valor da interpolação é a média ponderada das cotas dos vizinhos naturais, com o peso de cada vizinho proporcional à área “roubada” relativa [8].

Formalmente, podemos definir a estimativa  $Z(x)$  de  $z(x)$  por vizinhos naturais, da seguinte forma:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot z_i) \quad (5.4)$$

Seja  $V(p_i)$  o polígono de Voronoi do ponto  $p_i$  e seja  $V'(x)$  o polígono de Voronoi que o ponto  $x$  gera ao ser adicionado ao diagrama (ver tracejado na figura 5.3). Deste modo podemos definir o peso  $w_i$  dos vizinhos naturais de  $x$ , da seguinte forma:

$$w_i = \frac{\text{área}(V'(x) \cap V(p_i))}{\text{área}(V'(x))} \quad (5.5)$$

$p_i$ , com  $i = 1, \dots, n$ , os vizinhos naturais de  $x$ .

#### 4. Inverse Distance Weighting (IDW)

Poderemos traduzir este método por “interpolação ponderada pelo inverso da distância”. Este método é também uma média ponderada das cotas dos pontos mais próximos da nuvem mas, tendo apenas em consideração a distância a que os pontos se encontram do ponto cuja cota pretendemos determinar. O critério para se escolherem o número de pontos próximos a usar é variável: pode-se definir um  $n.^o$  de pontos a usar ou o número de pontos contidos num determinado raio de pesquisa ou ambos [12].

Formalmente, podemos definir este método pela seguinte fórmula:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot z_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (5.6)$$

Sendo:

$$w_i = \frac{1}{d_i^p} \quad (5.7)$$

- (a)  $d_i$ , a distância entre o ponto cuja cota pretendemos determinar e o ponto  $p_i$  da nuvem;
- (b)  $p$  é um n.º natural maior do que zero, sendo 2 o valor mais usado [12].

No caso do algoritmo IDW utilizado neste trabalho, foi o algoritmo desenvolvido por João Marnoto e que funciona do seguinte modo: *para cada ponto de controlo em estudo, o programa identifica os 4 pontos da nuvem mais próximos dele, um em cada quadrante: NW, NE, SE e SW; em seguida aplica aos 5 pontos em jogo o algoritmo IDW, atribuindo peso 1 aos 4 vizinhos dado que não há informação suplementar que permita distinguir a sua fiabilidade através de um peso.* Por outras palavras, o valor de  $p$  na equação acima é 1, sendo o peso  $w_i$  apenas o inverso da distância.

## 5. Melhor triângulo

O método do melhor triângulo é um método usado por João Marnoto e é em tudo semelhante ao método linear, com a diferença de que o triângulo usado é construído partindo do ponto a interpolar e não de uma rede de triângulos completa, previamente existente. Nesta abordagem inverte-se a forma de interpolação: enquanto que no método linear do MatLab se constrói primeiro a rede de triângulos e depois se determina qual o triângulo que melhor enquadra cada ponto, nesta abordagem parte-se do ponto a interpolar para se encontrar um triângulo envolvente, o que torna o algoritmo muito mais eficiente para o fim a que se destina, visto que apenas temos de construir um triângulo e não toda a rede irregular de triângulos para controlar a cota de um ponto. A metodologia para a construção deste triângulo é inicialmente semelhante à metodologia utilizada para o método IDW: começa-se por determinar os 4 pontos da nuvem mais próximos do ponto nos quadrantes referidos; de seguida ligam-se os vértices opostos por uma aresta, formando-se 2 configurações de triângulos; escolhe-se a configuração de triângulos cuja aresta comum é a menor; determina-se qual o triângulo que enquadra o ponto em análise; finalmente estabelece-se a interpolação linear usando-se para o efeito o método atrás exposto do sistema de coordenadas baricêntricas.

Como o método do melhor triângulo tem uma determinada tolerância de distância (ou raio) de interpolação entre o ponto de controlo e os 4 vizinhos mais próximos,

resulta que existem pontos de controlo que poderão não ser interpolados e que essa análise poderia ser importante, pelo que decidimos dividir a nossa análise em 2 fases:

**Fase 1:** Utilização dos métodos disponíveis pelo MatLab (linear e vizinho mais próximo) e o método disponível pela aplicação ncontrol (vizinhos naturais).

**Fase 2:** Comparação dos melhores métodos determinados na fase 1 com os métodos disponíveis pela aplicação de João Marnoto (IDW e melhor triângulo).

A fórmula usada no cálculo do Erro Médio Quadrático Altimétrico ( $EMQ_z$ ) foi a fórmula proposta pela DGT [33]:

$$EMQ_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{gnss_i} - Z_{interp_i})^2} \quad (5.8)$$

Em que:

$n$  – número de pontos de controlo;

$Z_{gnss_i}$  – Coordenada altimétrica do ponto  $i$ , obtida por métodos de grande precisão;

$Z_{interp_i}$  – Coordenada altimétrica do ponto  $i$ , obtida por interpolação.

## 5.1 Análise de alguns métodos de interpolação (fase 1)

Os métodos de interpolação em análise são os métodos disponíveis pelo MatLab e ncontrol. Em MatLab, os métodos de interpolação a que nos referimos estão disponíveis com a função *TriscatteredInterp Class*. O ncontrol é executado em linha de comandos Linux. Ambos os softwares têm como input a nuvem de pontos cotados e a lista de pontos de controlo, em formato de texto.

Dos 143 pontos de controlo iniciais, foram eliminados 28 pontos pelos seguintes motivos: 14 pontos por se encontrarem fora da área de estudo; 4 pontos por se encontrarem numa zona que foi sujeita a atividades de movimentações de terras no período decorrido entre a data do voo e a data do levantamento dos pontos de controlo; 2 pontos localizados na zona obscura da ortofotografia, devido à falha (referida anteriormente) das comunicações rádio entre o UAV e a estação terrestre de controlo e, finalmente, foram também eliminados 8 pontos por se encontrarem em duplicado (*i.e.*, a menos de 1 pixel de distância entre si), tendo sido escolhido (de entre os pontos duplicados) o ponto que apresentasse uma maior precisão 3D.

Tabela 5.1:  $EMQ_z$  calculado para os 3 métodos em análise e diferenças entre o melhor método e os restantes.

Método	$EMQ_z$ [m]	Diferenças [m]
natural	1.5790	0
linear	1.6121	0.0332
nearest	1.7449	0.1659

Ficamos assim com uma amostra final constituída por 115 pontos de controlo para o MDS.

Os resultados alcançados encontram-se descritos na tabela 5.1. Da análise desta tabela podemos concluir que o melhor método <sup>2</sup> dos 3 em análise, é o método dos vizinhos naturais, que é 3.32 cm melhor do que o método linear e 16.59 cm melhor do que o método do vizinho mais próximo.

Analisando os desvios de cada um dos 115 pontos de controlo para os 3 métodos (*natural*, *linear* e *vizinho mais próximo*), verifica-se o seguinte: em 43 dos 115 pontos de controlo, o método do vizinho mais próximo é o melhor; em 28 dos 115 pontos o método linear é o melhor e, nos restantes 44 pontos o método dos vizinhos naturais é o que apresenta melhores resultados. Deixando a comparação entre os métodos para a fase 2, em que entrarão também o IDW e o melhor triângulo, decidimos investigar porque é que o vizinho mais próximo tem tantos pontos em que é o melhor, apesar da diferença do  $EMQ_z$  entre este método e o dos vizinhos naturais (o método que regista melhores resultados) ser considerável (16.59 cm). Para este efeito, analisámos as diferenças entre os desvios do vizinho mais próximo com os desvios dos restantes métodos (linear e vizinhos naturais), nos pontos em que o vizinho mais próximo foi considerado o melhor método.

A fórmula a que é feita referência para a medição das diferenças é a seguinte:

$$\Delta diferen\c{a} = ||\Delta melhor| - |\Delta interp|| \quad (5.9)$$

Sendo:

- $\Delta diferen\c{a}$  - Módulo da diferença entre os módulos dos desvios do melhor método de interpolação e dos restantes, para o ponto de controlo em análise;
- $\Delta melhor$  - Valor do desvio da cota interpolada, usando o melhor método

<sup>2</sup>Por “melhor método” entende-se o método de interpolação que verificou um menor desvio entre a cota interpolada e a cota medida por métodos de grande precisão, para o ponto de controlo em análise.



Figura 5.4: Exemplo do ponto de controlo medido junto a um muro com cerca de 2.20 metros de altura e em que o método do vizinho mais próximo foi considerado o melhor método.

verificado para o ponto de controlo em análise;

- $\Delta_{interp}$  - Valor do desvio da cota interpolada, usando um dos restantes métodos estudados (que não o melhor método) para o ponto de controlo em análise.

A fórmula usada para o cálculo do desvio padrão amostral ( $\sigma$ ) foi a seguinte:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_{diferença})^2} \quad (5.10)$$

Sendo:

$n$  – Número de pontos de controlo em que cada um dos métodos é melhor do que os restantes.

Nesta análise verificámos que nos 43 pontos de controlo anteriormente referidos, apenas em 5 pontos se registaram diferenças significativas: 1 ponto com uma diferença superior a  $3\sigma$  entre o método do vizinho mais próximo e os restantes 2 métodos; 2 pontos com diferenças entre  $2\sigma$  e  $3\sigma$  para os restantes 2 métodos e, finalmente, 2 pontos com diferenças entre  $1\sigma$  e  $2\sigma$ , sendo que em um dos pontos a diferença só é significativa para o método dos vizinhos naturais, não o sendo para o método linear (apêndice A, tabela A.1). Analisando estes 5 pontos, verificamos que os pontos 13 ( $\Delta_{dif} > 3\sigma$ ) e o ponto 69 ( $1\sigma < \Delta_{dif} < 2\sigma$ ) (figura 5.4), foram tirados junto a muros altos;

os pontos 89 ( $2\sigma < \Delta dif < 3\sigma$ ) e 104 ( $1\sigma < \Delta dif < 2\sigma$ ), encontram-se na extremidade da ortofoto; o ponto 91 ( $2\sigma < \Delta dif < 3\sigma$ ) foi tirado numa zona plana mas que provavelmente sofreu erosão entre a data do voo e a data de medição dos pontos de controlo. Alargando a análise a todos os pontos em que o método do vizinho mais próximo foi o melhor, verifica-se que em 19 dos 43 pontos (44%), o ponto de controlo foi tirado junto a linhas de quebra ou perto de declives acentuados, como por exemplo muros altos, fachadas de casas, bermas de terraços, entre outras situações similares; 9 em 43 pontos (21%) foram tirados em zonas planas em pontos conspícuos (cantos de caixas de eletricidade, cantos de marcas no pavimento, etc.). Os restantes pontos encontram-se dispersos por zonas planas relativamente uniformes ou com sinais de erosão recente ou ainda em locais situados perto da extremidade da ortofoto (e consequentemente do MDS).

Caso os pontos de controlo do modelo MDS tivessem sido maioritariamente coordenados em sítios planos ou, no máximo, com declives suaves, eventualmente teríamos obtido menos situações em que o método do vizinho mais próximo tivesse sido o melhor método visto que, claramente, o método do vizinho mais próximo é o pior método dos 3 métodos analisados (tal como podemos ver pelos valores do  $EMQ_z$ ). No caso de declives acentuados e linhas de quebra, qualquer dos métodos de interpolação pode utilizar pontos do MDE localizados na base, parede e topo da estrutura medida, introduzindo muitas vezes um erro superior ao erro introduzido pelo ponto do MDE mais próximo do ponto de controlo. Nas situações analisadas, poderá ter sido este o facto ocorrido.

Desta primeira análise verificámos também que existiram alguns pontos de controlo cujas cotas interpoladas por qualquer um dos métodos em estudo registaram desvios consideravelmente elevados, comparativamente aos desvios dos restantes pontos. Procedemos por isso, à análise das 2 piores situações: o ponto 106 com cerca de -12.7 metros em relação à respetiva cota medida por métodos de grande precisão ( $\Delta dif > 3\sigma$ , para qualquer dos métodos) (figuras 5.5 e 5.6); e o ponto 110, com cerca de -4.5 metros de desvio em relação à cota mais exata ( $2\sigma < \Delta dif < 3\sigma$ , para qualquer dos métodos) (figuras 5.7, 5.8 e 5.9).

A torre dos bombeiros tem cerca de 12 metros de altura, sendo um edifício relativamente isolado, em altura, dos edifícios circundantes. Pela análise das figuras 5.5 e 5.6 e tendo conhecimento das cotas dos pontos envolvidos, podemos constatar que não existem pontos da nuvem no topo da torre onde foi medido o ponto de controlo; por outro lado, a segunda constatação é de que a maior parte dos pontos da nuvem que contribuíram para o cálculo provêm de muito perto da zona de implantação do edifício (conforme se pode verificar na figura 5.6 pela linha que um conjunto de



Figura 5.5: Extrato da ortofoto com torre dos bombeiros e extrato de 20mx20m da nuvem de pontos do MDS à volta do ponto de controlo 106 (a azul) e vizinhos naturais (a vermelho) que contribuirão para o cálculo da cota deste ponto. Vista de topo.

pontos da nuvem forma); os 2 vizinhos naturais localizados mais a leste, provêm da cobertura de um edifício contíguo à torre, com cerca de 4 metros de altura; os 5 pontos localizados mais a oeste e sensivelmente à mesma cota dos 2 pontos anteriormente referidos, deverão ter origem na fachada da própria torre; a torre não está corretamente ortorretificada e, provavelmente, encontra-se sobredimensionada em relação à realidade (conforme se pode verificar pela própria imagem e pelos pontos da fachada que aparecem no topo da torre e não deveriam aparecer, por apresentarem uma cota inferior).

Pela análise das figuras 5.7, 5.8 e 5.9, relativas ao ponto de controlo 110, podemos fazer as seguintes constatações: a imagem do pátio é praticamente inexistente na orto-imagem aliás, é uma zona de coberturas complexas (com diferentes dimensões, orientações e ângulos de inclinação numa área relativamente “compacta”) e em que se registam muitos problemas de ortorretificação (artefactos); no pátio e na zona imediatamente circundante não existem pontos resultantes da nuvem de pontos, tal como se pode constatar pelo extrato da ortofoto (figura 5.7); a maior parte dos pontos da nuvem foram tirados ao nível do solo ou muito perto deste, com origem na rua imediatamente antes e de um logradouro imediatamente a seguir, segundo a vista de frente (figura 5.9).

Uma possível explicação para os problemas encontrados poderá estar relacionada com a baixa altura de voo (87.4 m de altura média de voo acima do solo) conjugada





Figura 5.6: Localização do ponto de controle 106 e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto. Vista de frente (olhando para a origem a partir do lado negativo do eixo dos yy).



Figura 5.7: Extrato da ortofoto e extrato de 20mx20m da nuvem de pontos do MDS à volta do ponto de controle 110 (a azul), tirado num terraço de habitação e vizinhos naturais (a vermelho) que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto. Vista de topo.

com a elevada altura, complexidade e pequena dimensão dos pátios estudados, fez com que pudessem ter ocorrido alguns dos seguintes problemas em fotografias adjacentes: ângulos de visão (do mesmo objeto) demasiado diferentes entre si; baixa sobreposição entre fotografias; a própria complexidade do edificado poderá ter impedido a visão dos pátios segundo alguns dos ângulos usados. Desta forma, tornou-se



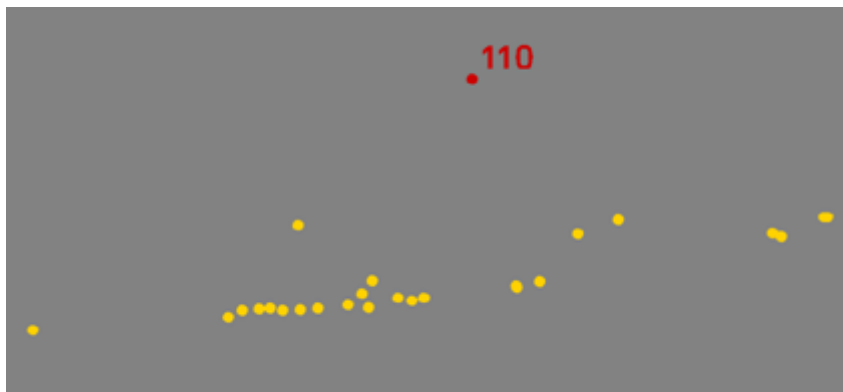


Figura 5.8: Localização do ponto de controle 110, tirado num pátio de habitação e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto. Vista de frente (olhando para a origem a partir do lado negativo do eixo dos yy).



Figura 5.9: Localização do ponto de controle 110, tirado num pátio de habitação e vizinhos naturais que contribuíram para o cálculo da cota deste ponto. Vista da direita (olhando para a origem a partir do lado positivo do eixo dos xx).

muito difícil ou mesmo impossível a criação de pontos de interesse comuns nesses locais, impedindo a correta modelação da superfície.

A diferença do ponto 110 para o ponto 106, tem apenas a ver com a menor altura do pátio e a maior complexidade de coberturas, o que originou uma situação onde coexistem mais artefactos.

Para testar estas hipóteses, seria necessário realizar um voo a uma altura superior (ou uma escala menor de voo) e, com fiadas cruzadas, para que tenhamos mais imagens dos mesmos objetos, numa área de pesquisa relativamente curta. Perde-se em resolução espacial mas poderá ganhar-se em maior qualidade do MDS e consequentemente maior qualidade na ortorretificação.

Tabela 5.2:  $EMQ_z$  calculado para os 4 métodos em análise e diferença entre o melhor método e os restantes.

Método	$EMQ_z$ [m]	Diferenças [m]
Melhor triângulo	0.6894	0
IDW	0.6977	0.0083
Vizinhos Naturais	0.7071	0.0177
Linear	0.7154	0.0261

## 5.2 Estudo comparativo dos métodos de interpolação (fase 2)

Pretende-se agora nesta fase 2 comparar os métodos analisados na fase 1 com os métodos IDW e melhor triângulo. Dos métodos disponíveis pelo MatLab decidimos usar apenas os resultados do método linear. Descartámos desta análise o método do vizinho mais próximo por, comprovadamente ser o método que nos deu piores resultados na primeira fase.

Tal como na primeira fase, não usámos nesta análise os pontos localizados na zona que foi sujeita a atividades de movimentações de terras; não usámos os pontos situados na região obscura da ortofoto e, finalmente, eliminámos também os pontos duplicados (situados a uma distância entre si inferior a um pixel).

Numa amostra constituída por 91 pontos, os resultados do  $EMQ_z$  foram os seguintes: pela análise da tabela 5.2, verificamos que o melhor método é o método do melhor triângulo, com o menor  $EMQ_z$ , seguido do IDW, vizinhos naturais e, finalmente o método linear. Tal como para a fase 1, para tentarmos compreender as diferenças existentes entre os métodos, realizámos uma análise dos desvios, analisando apenas aqueles que têm uma diferença, com os desvios de todos os outros métodos, superior a 1 *sigma*. Desta análise dos desvios resultou o seguinte (apêndice B, tabela B.1): (1) o método do melhor triângulo tem um ponto de controlo cujo desvio é significativamente menor do que o desvio registado por todos os outros métodos, com uma diferença superior a 3 *sigma* (ponto de controlo 96); (2) o método IDW tem 3 pontos com uma diferença entre 1 *sigma* e 3 *sigma* (PC 82, 76 e 48); 1 ponto com uma diferença superior a pelo menos 2 *sigma* (PC 140) e 1 ponto com uma diferença superior a 3 *sigma* (PC 13); (3) o método dos vizinhos naturais tem 2 pontos de controlo que registam uma diferença superior a 2 *sigma* (PC 28 e PC 46); (4) finalmente, o método linear não regista nenhum ponto cujo desvio na cota interpolada seja significativamente menor (diferença superior a 1 *sigma*) do que o desvio da cota registada por todos os outros métodos analisados. Contudo, existe

um ponto (PC 136), em que o desvio da cota interpolada pelo método linear é significativamente inferior (diferença superior a 3 *sigma*) ao desvio da cota interpolada pelo método do melhor triângulo, sendo também significativamente inferior à cota interpolada pelo método IDW (neste caso apenas com uma diferença significativa que se situa entre 2 *sigma* e 3 *sigma*). Decidimos também analisar esta diferença porque o método do melhor triângulo é suposto ser melhor do que o método de um triângulo feito *a priori* (como é o caso da triangulação de Delaunay aplicada pelo método linear que não considera previamente os pontos a interpolar). Apesar de o método IDW ter 5 pontos de controlo cuja cota interpolada é melhor do que os restantes métodos, verifica-se que em 4 dos 5 pontos, os pontos se situam junto a muros muito elevados (altura superior a 2 metros) e ou perto de fachadas de habitações, pelo que, tratando-se de linhas de quebra não considerámos relevante para análise. Existe, no entanto, um ponto de controlo que mereceu a nossa atenção, por se encontrar numa zona relativamente plana, junto a um muro com cerca 1.5m de altura. Neste ponto, o ponto 48, verifica-se que o método do IDW é melhor do que os restantes 3 métodos em estudo, com uma diferença que varia entre 5.1cm e 4.5cm.

De entre as opções disponíveis, na figura 5.10, para a interpolação do ponto de controlo 48, a combinação IDW é a que apresenta melhores resultados. Certamente que, neste caso, o ponto assinalado a amarelo escuro (que pertence ao quadrilátero do IDW), vai minimizar o impacto negativo que um (ou mais) dos 3 pontos do método do melhor triângulo estará a exercer na interpolação. No caso do método dos vizinhos naturais, certamente que o vizinho natural assinalado a vermelho e localizado já muito em cima do muro, influencia negativamente a interpolação do ponto em estudo.

O método do melhor triângulo tem apenas um ponto de controlo (PC 96) cujo valor da cota interpolada é muito melhor do que os valores de cota registados pelos restantes métodos (para cima de 3 *sigma* melhor), com uma diferença que varia entre 0.51m para o método IDW e 1.47m para o método linear (ver apêndice B, tabelas B.1 e B.2). Fomos analisar em detalhe este ponto (figura 5.11).

O ponto de controlo 96 encontra-se perto de 3 linhas de quebra: 2 varandas, a poente e a nascente, e um edifício a sul ligeiramente mais elevado. Este terraço estreito, sem pontos assinalados do MDS e situado numa zona habitacional compacta e fortemente irregular, poderia ser suscetível de ser eliminado da nossa análise. No entanto considerámos interessante analisá-lo por ser o único em que o método do melhor triângulo é claramente superior a todos os outros métodos. Também porque o ponto não foi coordenado exatamente no local onde está assinalado mas sim



Figura 5.10: Extrato da ortofoto e extrato aproximado de 0.5x0.5m da nuvem de pontos do MDS à volta do ponto de controlo 48 (a azul escuro) tirado numa rua, numa esquina de muro (conjunto de pixéis de cor branca, no lado direito do ponto). Pontos a amarelo: combinação de pontos do MDS utilizados para a interpolação pelo método IDW; Pontos a amarelo, ponto laranja e ponto vermelho: combinação de pontos usados pelo método dos vizinhos naturais; pontos assinalados somente a amarelo claro: combinação de pontos usados pelo método do melhor triângulo. Vista de topo.

numa zona mais central do pátio. Pelas razões já referidas na fase 1 (baixa altura de voo, altura e pequena dimensão do terraço), provavelmente impediram a existência de um n.º suficiente de fotografias do terraço para que ele fosse devidamente ortorretificado. No entanto, apesar de todas as condicionantes, esta situação mostra muito claramente porque é que, por vezes, menos vértices usados da nuvem resultam em melhor interpolação: o ponto 96 está praticamente sobre uma das arestas do triângulo cujos vértices são pontos da nuvem que estão próximos (em distância e em cota) do ponto interpolado. Quanto mais vértices, de entre os disponíveis, se utilizarem, mais “ruído” será introduzido no cálculo. O ponto relativo ao vértice do triângulo situado na rua em baixo contribui com um peso insignificante na interpolação realizada por este método.

O método dos vizinhos naturais mostrou ser claramente superior nas situações assinaladas nas figuras 5.12 e 5.13. Em ambas as figuras se verifica existir uma considerável densidade de pontos a uma cota semelhante à cota do ponto de controlo em estudo. Pontos estes que, contrariamente à situação anterior do terraço, poderão contribuir positivamente para o cálculo da cota interpolada do ponto em

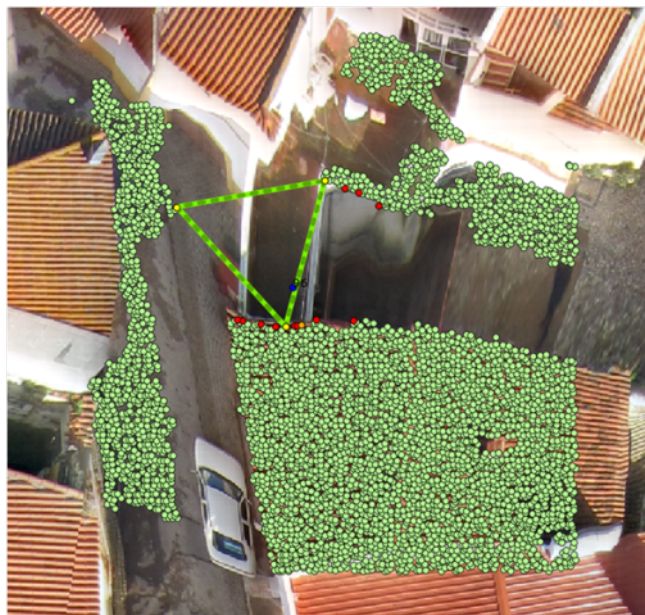


Figura 5.11: Extrato da ortofoto e extrato aproximado de 15 x 15m da nuvem de pontos do MDS à volta do ponto de controlo 96 (a azul escuro), medido num pátio de habitação. Pontos a amarelo: combinação de pontos do MDS utilizados para a interpolação pelo método IDW; Pontos a amarelo e pontos vermelhos: combinação de pontos usados pelo método dos vizinhos naturais; pontos assinalados somente a amarelo claro e ligados por um triângulo verde: combinação de pontos usados pelo método do melhor triângulo. Vista de topo.

análise. No caso do ponto de controlo 46, os vizinhos naturais a norte do ponto de controlo, encontram-se numa zona indesejada de artefactos, podendo contribuir negativamente para o cálculo da interpolação. No entanto, certamente terão um peso menor para estes cálculos do que os pontos da nuvem localizados mais próximo do PC e a uma cota semelhante. Por outro lado, verifica-se também que o método IDW e o método do melhor triângulo, têm um dos vértices (o vértice situado mais a oeste), consideravelmente afastado do PC. No entanto, as diferenças do melhor método dos vizinhos naturais para os restantes, varia entre 6.1 cm para o método linear e 9.3 cm para o método IDW, diferenças estas que não são tão assinaláveis como no caso anterior do método do melhor triângulo.

Finalmente, falta a análise do ponto 136 (figura 5.14), em que verificámos que o desvio da cota interpolada pelo método linear é significativamente inferior (diferença superior a  $3\sigma$ ) ao desvio da cota interpolada pelo método do melhor triângulo e também, significativamente inferior à cota interpolada pelo método IDW e a explicação afigura-se-nos simples: o PC 136 encontra-se numa zona de artefactos e linha de quebra, não sendo um bom ponto para análise. Nestas situações, qualquer resultado é imprevisível.

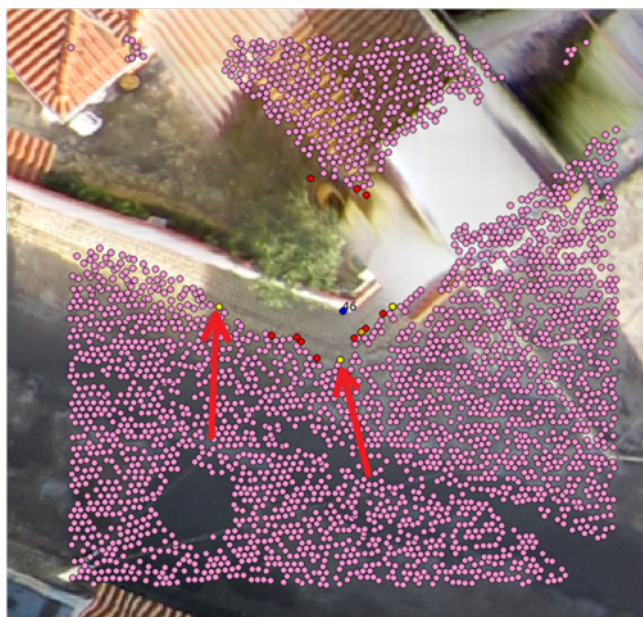


Figura 5.12: Extrato da ortofoto e extrato aproximado de 11 x 11m da nuvem de pontos do MDS à volta do ponto de controlo 46 (a azul escuro), medido na esquina de um muro com aproximadamente 1.8 metros de altura. Pontos a amarelo: combinação de pontos do MDS utilizados para a interpolação pelo método IDW; Pontos amarelos e pontos vermelhos: combinação de pontos usados pelo método dos vizinhos naturais (exceto pontos assinalados pelas setas vermelhas); pontos assinalados somente a amarelo claro: combinação de pontos usados pelo método do melhor triângulo. Vista de topo.

### 5.3 Sumário e conclusões

Claramente existem 2 métodos de interpolação que se encontram em pólos opostos pela quantidade de pontos usados no cálculo: o método do vizinho mais próximo que “peca por defeito” na quantidade de pontos usados na interpolação (apenas um ponto) e, por outro lado, o método dos vizinhos naturais, que pode utilizar uma quantidade considerável de pontos. Entre os 2 métodos situam-se o método IDW utilizado, o método do melhor triângulo e o método linear. Verifica-se também que o método do melhor triângulo é, em muitas das situações estudadas, igual ao método linear (em 52 dos 91 pontos de controlo estudados, i.e., 57%, a diferença entre os 2 métodos é nula, possivelmente porque usam o mesmo triângulo), no entanto, nos pontos em que há diferença, esta diferença é notória, favorecendo claramente o método do melhor triângulo, conforme se pode verificar pelos resultados do  $EMQ_z$ . Pela diversidade encontrada de cobertura do solo na zona em análise, em que coexistem zonas relativamente planas com zonas de edificado fortemente compacto e de coberturas extremamente irregulares na forma, inclinação e sentido, o método do melhor triângulo verificou ser o método mais equilibrado, visto que nas situações



Figura 5.13: Extrato da ortofoto e extrato aproximado de 1.3x1.3m da nuvem de pontos do MDS à volta do ponto de controlo 28 (a azul escuro), medido na esquina de um tanque com aproximadamente 40 cm de altura. Pontos a amarelo: combinação de pontos do MDS utilizados para a interpolação pelo método IDW; Pontos a amarelo e pontos vermelhos: combinação de pontos usados pelo método dos vizinhos naturais; pontos assinalados somente a amarelo claro: combinação de pontos usados pelo método do melhor triângulo. Vista de topo.

em que é pior não é assim tão pior que os outros métodos e nas situações em que é melhor pode ser claramente melhor, conforme se verificou. No entanto é possível que, em situações ótimas em que temos uma elevada densidade de pontos do MDS e terreno plano ou pouco inclinado, que o método dos vizinhos naturais possa apresentar melhores resultados. Pela própria natureza dos métodos e que já foram ambos devidamente explicados, coloca-se a hipótese de que, mesmo que se verifique que numa determinada situação o método dos vizinhos naturais seja o melhor método, as diferenças encontradas para os restantes métodos dificilmente serão tão grandes como algumas das diferenças encontradas entre o método do melhor triângulo e os restantes métodos, isto porque, normalmente, o método do melhor triângulo usa quase sempre pontos que são também usados pelo método dos vizinhos naturais. No entanto, mais testes deverão ser realizados para comprovar esta hipótese. Outra potencial vantagem tanto do método IDW utilizado como do método do melhor triângulo, tem a ver com a abordagem à interpolação: apesar de, em boa verdade, todos os métodos partirem do ponto a interpolar para determinar o conjunto de pontos da nuvem a usar na interpolação, os pontos da nuvem escolhidos pelo método IDW e pelo método do melhor triângulo não estão previamente condicionados





Figura 5.14: Extrato da ortofoto e ponto de controle 136 (a azul escuro), medido na esquina exterior de um estrado de madeira encostado à parede vertical da casa. Pontos a amarelo: combinação de pontos do MDS utilizados para a interpolação pelo método IDW; Pontos a amarelo e pontos vermelhos: combinação de pontos usados pelo método dos vizinhos naturais; pontos assinalados somente a amarelo claro: combinação de pontos usados pelo método do melhor triângulo. Vista de topo.

por uma rede de triângulos de Delaunay ou pelo seu dual (o diagrama de Voronoi), contrariamente aos métodos dos vizinhos naturais e linear utilizados na nossa análise.

Por último, uma palavra de referência para o objetivo primeiro que motivou esta análise: o controlo de qualidade posicional do MDS. Caso pudéssemos comparar diretamente os resultados do  $EMQ_z$  do MDS com a exatidão exigida pela DGT para o controlo altimétrico do MNA, verificaríamos que o melhor resultado do  $EMQ_z$  alcançado (0.6894 metros para o método do melhor triângulo) é superior ao exigido para a escala 1:2000 (0.45 metros) mas inferior ao  $EMQ_z$  exigido para a escala 1:5000 (1.10 metros) [10]. Como vimos, uma grande responsabilidade dos erros encontrados no controlo posicional deveu-se à utilização de pontos situados junto a linhas de quebra. Eliminando todos os pontos da nuvem situados acima do solo, gerando o MDT e depois o MNA, acreditamos que se alcançariam resultados dentro das tolerâncias exigidas para a escala 1:2000 e quiçá mesmo para a escala 1:1000.





## Capítulo 6

# Análise da qualidade da ortofotografia

A ortofotografia constitui um produto importante da cadeia de produção cartográfica. Uma imagem ortofotográfica de qualidade causa sempre grande impacto em qualquer pessoa (como um decisor político, por exemplo) visto que é facilmente interpretável. Por outro lado, as ortofotos são muito utilizadas em sistemas de informação geográfica, permitindo posicionar planimetricamente com mais ou menos exatidão todo o conjunto de entidades visíveis. Têm por isso, uma importância visual grande, além de permitirem a realização de medições.

Uma ortofoto, ortofotografia ou ainda orto-imagem, é uma fotografia aérea geometricamente corrigida (ortorretificada) de tal forma que a escala é uniforme: a (orto) foto tem a mesma ausência de distorção de um mapa. Contrariamente a uma fotografia aérea não corrigida, uma ortofotografia pode ser utilizada para medir distâncias, porque é uma representação da superfície terrestre corrigida dos erros relativos à variação da superfície topográfica (distorção perspectiva); corrigida da distorção provocada pelas lentes da máquina fotográfica (sendo a mais relevante a distorção radial); e corrigida da inclinação da câmara relativamente à superfície topográfica (distorção projetiva) [25].

No processo clássico de ortorretificação é usado o MDT para se obter o valor de cor mais adequado para cada posição da orto-imagem. O problema desta técnica é que a maior parte dos objetos construídos pelo Homem (edifícios e pontes, por exemplo), continuam a sofrer de distorções perspectivas já que a amostra primária de pontos cotados do MDT se encontra localizada ao nível do solo. Por outro lado, as áreas tapadas por essas estruturas não são visíveis na ortofoto e as ortofotos podem ainda apresentar-se incompletas ou geometricamente pouco exatas em algumas partes. A utilização do MDS para gerar as ortofotos pode ultrapassar alguns destes

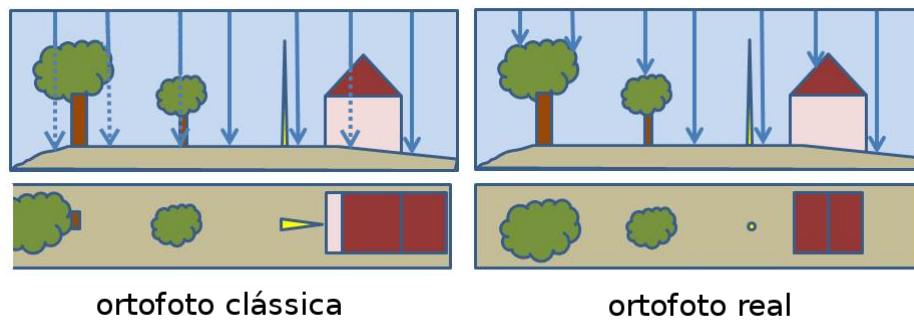


Figura 6.1: Comparação entre uma ortofoto clássica cuja retificação se baseia num MDT e uma ortofoto real cuja retificação se baseia num MDS (adaptado de [26]).

inconvenientes, já que as construções humanas passam a poder ser projetadas para a sua posição geométrica correta, *i.e.*, falamos de uma verdadeira projeção ortogonal (ou perpendicular) para todos os objetos sobre o plano de projeção, independentemente da sua altura (figura 6.1). Não deixam, no entanto, de existir problemas na geração de ortofotos a partir do MDS [4]:

- As áreas tapadas (ou oclusas) por construções que ocorrem nas fotografias originais, têm de ser preenchidas por combinação de várias ortofotos da mesma área;
- Os telhados devem ser previamente modelados (estereorrestituídos), caso desejemos que apareçam na ortofotografia sem distorções ou com os beirados deformados.

Frequentemente acontece que nem todas as áreas oclusas conseguem ser preenchidas, por inexistência de número suficiente de ortofotos da mesma zona e, por outro lado, que seja do nosso conhecimento, a modelação automática a partir do MDS ainda não é perfeita e, para ser realizada de modo interativo pode consumir muito tempo, encarecendo o produto final. As ortofotos que se baseiam no MDS e em que as áreas oclusas estão devidamente repostas pela sua realidade, são conhecidas como ortofotos reais (*true-orthophoto*, em designação inglesa) [4]. A palavra “real” (ou “true”) significa que os objetos estão ortogonalmente projetados no plano da ortofoto.

Como vimos no capítulo 1, as ortofotos produzidas pelo Postflight 3D são ortofotos reais, cujo processo de produção é inteiramente automático. Foi para compensar a correta ortorretificação das áreas oclusas que a sobreposição entre fotografias na mesma fiada e entre fiadas foi de 90% e 60%, respetivamente. No entanto, nenhuma correção interativa foi feita das coberturas (até porque o software não permite a introdução destes elementos). Nos procedimentos para os trabalhos de fiscalização

da execução de ortofotografias e cartografia digital à escala 1:2000 da DGT [33] é realçado que os parâmetros a verificar para a produção de ortofotografias são: a *dimensão do pixel*, a *qualidade da imagem* e a *exatidão posicional planimétrica*. Por outro lado, pretende-se também estudar o efeito da quantidade e distribuição dos PFs na qualidade da ortofoto. Assim sendo, dividiremos a nossa análise em: análise da qualidade temática; análise da qualidade posicional e análise da influência do n.º de PFs na qualidade da ortofoto. A produção da ortofoto relativa às 2 primeiras análises foi realizada com recurso à versão mais antiga do Postflight Terra 3D (versão 1.22291) com utilização de 10 PFs do levantamento posicional efetuado no próprio dia do voo, enquanto que o estudo da influência do n.º de PFs foi já realizada com a nova versão 2.2.2 (build 2.2.16) do software Postflight Terra 3D, tendo também já incluído PFs do 2º levantamento posicional realizado em Maio de 2013.

## 6.1 Análise da qualidade temática

A DGT exige uma resolução espacial da ortofotografia definida por um pixel de 10 cm [36]. No nosso caso temos um pixel de 3 cm, portanto uma resolução espacial muito superior ao exigido para esta escala.

A resolução radiométrica é de 24 bits e 3 bandas espectrais correspondentes ao azul, verde e vermelho (8 bits por cada banda espectral) dando origem a uma imagem a verdadeira cor. A ortofoto é relativamente homogénea em termos de cor, brilho e contraste, não se tendo detetado, visualmente, zonas contrastantes.

Para além de uma zona da ortofoto que não foi renderizada (ver limite sudoeste da ortofoto patente na figura 2.9), não se deteta, numa escala pequena de visualização, grandes artefactos. Aumentando a escala, percebemos que existem muitos artefactos. Relatamos os principais e/ou mais comuns:

- O artefacto dominante é a deformação das coberturas das habitações, seja a sobreposição de coberturas, a deformação das linhas de cumeeira e beirado e também a visualização de fachadas (típico de ortofotos clássicas) e que resultou, provavelmente, de insuficiente número de fotografias de diferentes perspetivas dos mesmos objetos (figura 6.2). Por causa dos artefactos verificados nas coberturas, foi muito frequente a deformação de objetos próximos, inclusive a própria via de circulação;
- Outro artefacto também detetado foi o conhecido “efeito fantasma” (figura 6.3), normalmente provocado por uma área de oclusão não detetada pelo software de ortorretificação e, por isso, preenchido pelo conteúdo da mesma imagem;



Figura 6.2: Diferentes tipos de artefactos encontrados na ortofoto: sobreposição de coberturas (mais à esquerda na imagem); visualização de fachadas (em cima na imagem) e deformação de coberturas (mais à direita na imagem).



Figura 6.3: Artefacto do tipo “efeito-fantasma”.

- Finalmente outra situação já relatada e que ocorreu no canto sudoeste da ortofoto foi a existência de uma região vazia ou não renderizada da ortofoto, resultante da falha nas comunicações entre avião e estação de controlo e que impossibilitou a geração da amostra primária de pontos cotados nesse local.

## 6.2 Análise da qualidade posicional

Conforme referido, para o controlo posicional planimétrico da ortofotografia foi tomada em consideração a metodologia proposta pela DGT [33], a saber:

Tabela 6.1: Erros posicionais planimétricos permitidos na ortofotografia em função da escala da carta.

Escala da carta	1:1000	1:2000	1:5000
EMQ [m] $\leq$	0.18	0.30	0.75
90% dos desvios da amostra têm de apresentar um desvio [m] $<$	0.27	0.45	1.25

- A dimensão da amostra igual ou superior a 30 pontos, sempre que a área total da ortofotografia seja igual ou inferior a 1000 ha;
- Fórmula a usar no cálculo do Erro Médio Quadrático ( $EMQ$ ):

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(M_{it} - M_{ic})^2 + (P_{it} - P_{ic})^2]} \quad (6.1)$$

Sendo:

$n$  – número de pontos da amostra;

$M_{it}, P_{it}$  – coordenadas planimétricas, “Terreno”, obtidas pela fiscalização, para o ponto  $i$ ;

$M_{ic}, P_{ic}$  – coordenadas planimétricas, “Controlo”, do mesmo ponto na ortofotografia.

Apesar de terem sido escolhidos 30 pontos de controlo, um deles teve de ser eliminado por não se conseguir identifica-lo bem na ortofotografia. Ficámos assim com 29 pontos de controlo, cobrindo tanto quanto possível a área da ortofoto.

Para ortofotografias de cartas de grandes escalas, a DGT admite os erros e desvios constantes da tabela 6.1 [10].

A DGT não especificou a sua noção de “desvio” neste contexto e, por poder ser dúbio ou dar origem a outras interpretações, entendemos por isso expor a nossa noção: “desvio” é tão simplesmente o caminho mais curto entre 2 pontos. No caso do presente estudo corresponde à menor distância planimétrica entre a coordenada medida na ortofoto e a coordenada obtida por métodos de grande precisão, cuja fórmula resulta da aplicação do já conhecido teorema de Pitágoras:

$$r = \sqrt{(M_t - M_c)^2 + (P_t - P_c)^2} \quad (6.2)$$

em que:  $r$  – Desvio planimétrico do ponto em estudo;

$M_t, P_t$  – coordenadas planimétricas, “Terreno”, obtidas pela fiscalização, para o ponto em estudo;



Figura 6.4: Disposição dos pontos de controle (cruzes) e pontos fotogramétricos (pontos) no enquadramento da ortofoto. A vermelho: pontos de controle que registaram erros mais elevados.

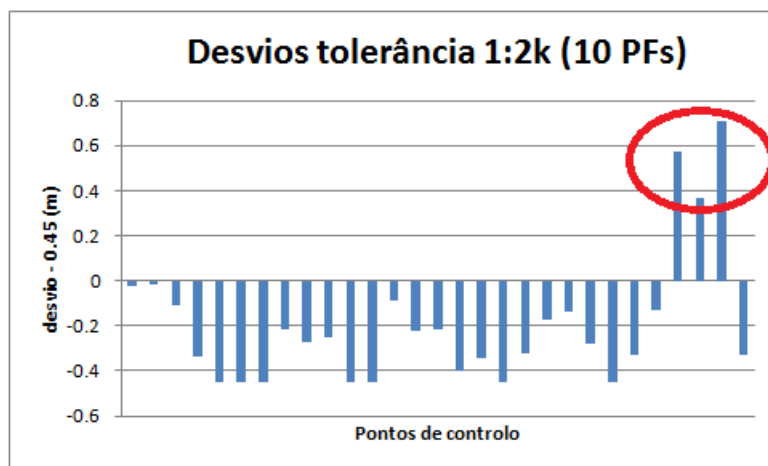


Figura 6.5: Desvios dos pontos de controle em relação ao desvio máximo admitido para a escala da carta 1:2000. A vermelho: pontos de controle que registaram desvios superiores ao permitido para a escala da carta 1:2000.

$M_c, P_c$  – coordenadas planimétricas, “Controlo”, do mesmo ponto na ortofotografia.

Considerando os 29 pontos de controle e o processamento realizado com 10 PFs do primeiro levantamento posicional, obtivemos um EMQ de 0.38 m e a seguinte percentagem de desvios dentro da tolerância em função da escala da carta: 66% para a escala 1:1000; 90% para a escala 1:2000; 100% para a escala 1:5000.

A figura 6.4 representa o enquadramento da ortofoto com a disposição dos 10 PFs e 29 PCs. Verificamos pela análise deste enquadramento que existem 3 PCs (assinalados a vermelho) que, para além de estarem mais afastados dos PFs que os

restantes PCs, se encontram perto da extremidade da ortofoto e perto de onde ocorreu a falha de comunicações entre UAV e estação de controlo, tudo contribuindo para os erros de 40 – 70 cm, registados por estes pontos, superiores à tolerância admitida para a escala 1:2000 (figura 6.5, assinalados a vermelho). Apesar de a ortofoto ter a percentagem dos desvios dos seus pontos de controlo dentro da tolerância exigida para a escala 1:2000 (90%), o erro de 0.38 metros é superior ao máximo exigido pela DGT para esta escala (0.30 metros), pelo que a ortofoto apenas cumpre os critérios de qualidade posicional exigidos para a escala 1:5000 e inferior. Se a área de interesse da ortofoto fosse uma área mais central do que a área da ortofoto em análise e pudéssemos assim prescindir da área coberta pelo 3 PCs referidos, o nosso erro baixaria para 0.22 metros, ficando dentro da tolerância de erro permitida pela DGT para a escala 1:2000.

## **6.3 Análise da influência do n.º e disposição de PFs**

Para esta análise decidimos realizar 4 processamentos com o software Postflight Terra3D: um processamento com 5 PFs, 10 PFs, 20 PFs e 33 PFs, com a produção, em cada processamento, dos produtos já referidos no capítulo 2.

Como a densidade e disposição de PFs na área da ortofotografia e a utilização da nova versão do PostFlight Terra 3D poderiam influenciar não apenas a qualidade posicional mas também a qualidade temática, também aqui se dividiu a análise da qualidade em análise da qualidade temática e análise da qualidade posicional.

### **Análise da qualidade temática**

De um modo geral, verifica-se uma melhoria da qualidade temática da ortofotografia, com a nova versão do software de processamento PostFlight Terra 3D e também com a nova disposição e/ou aumento de PFs. A lacuna sentida no primeiro processamento quase que deixa de existir nestes novos processamentos (figura 6.6). Por outro lado, verifica-se nesta figura que a ortofoto resultante do processamento de 5 PFs preenche as áreas oclusas com as mesmas fotografias (ou a mesma fotografia), provavelmente devido à falta de mais imagens daquela zona (zonas assinaladas a vermelho). Esta constatação torna-se mais óbvia com dados dos relatórios produzidos pelo novo software, em que se verifica que a zona em causa tem apenas 1 fotografia disponível e que toda a zona sudoeste da ortofotografia está muito pobre em sobreposições (figura 6.7). Do processamento de 5 PFs para o processamento de 20 PFs nota-se



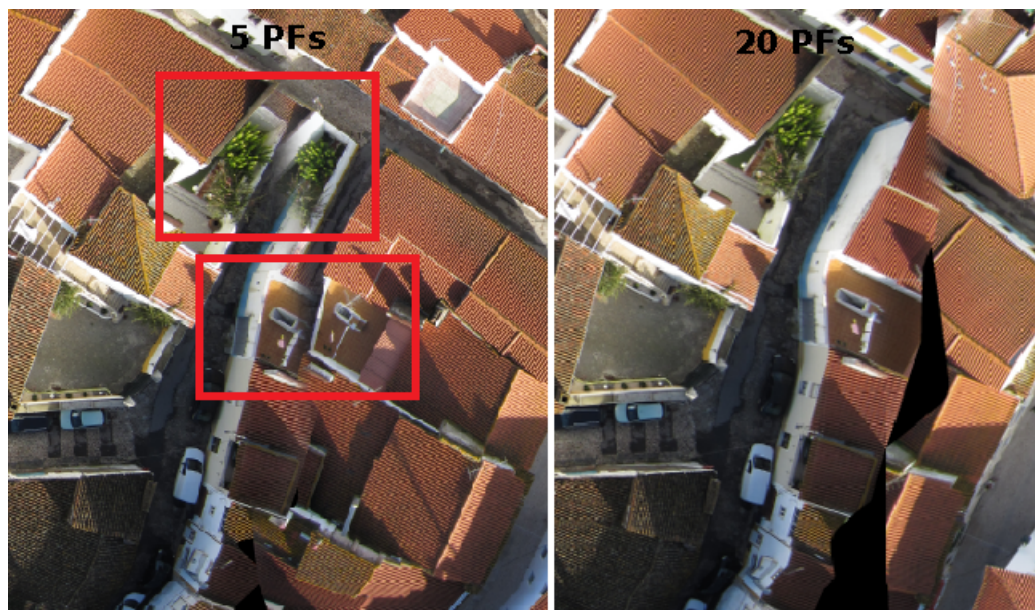


Figura 6.6: Parte não renderizada da ortofoto inicial, com novo processamento de 5 e 20 PFs e nova versão do software Postflight Terra 3D. Áreas assinaladas a vermelho: “efeito-fantasma”.

Tabela 6.2: Erros e percentagem de desvios dentro da tolerância para os diferentes processamentos realizados e escalas de carta.

N.º de PFs	EMQ [m]	Desvios dentro da tolerância [%]			Critério de qualidade DGT
		1:1000	1:2000	1:5000	
5	0.21	86	90	100	1:2k ou inferior
10	0.11	97	100	100	1:1K ou inferior
20	0.09	100	100	100	1:1K ou inferior
33	0.09	100	100	100	1:1K ou inferior

o desaparecimento do “efeito-fantasma” mas a área da lacuna aumentou e outros artefactos surgiram.

### Análise da qualidade posicional

Conforme esperado, a qualidade posicional melhorou com o aumento do n.º e distribuição de PFs. O que não deixa de ser relevante é que o novo processamento de 5 PFs com um erro médio quadrático de 0.21 metros (tabela 6.2) obteve melhores resultados do que o primeiro processamento feito com 10 PFs e anterior versão do PostFlight Terra 3D. Para este facto deverá ter contribuído decisivamente a nova versão do software mas também a existência de um PF situado mais perto da área problemática (figura 6.8). De qualquer modo os 3 PCs problemáticos continuaram a registar desvios elevados neste processamento de 5 PFs, conforme se pode verificar pelo gráfico respetivo patente na figura 6.9, mas que foram diminuindo à medida que

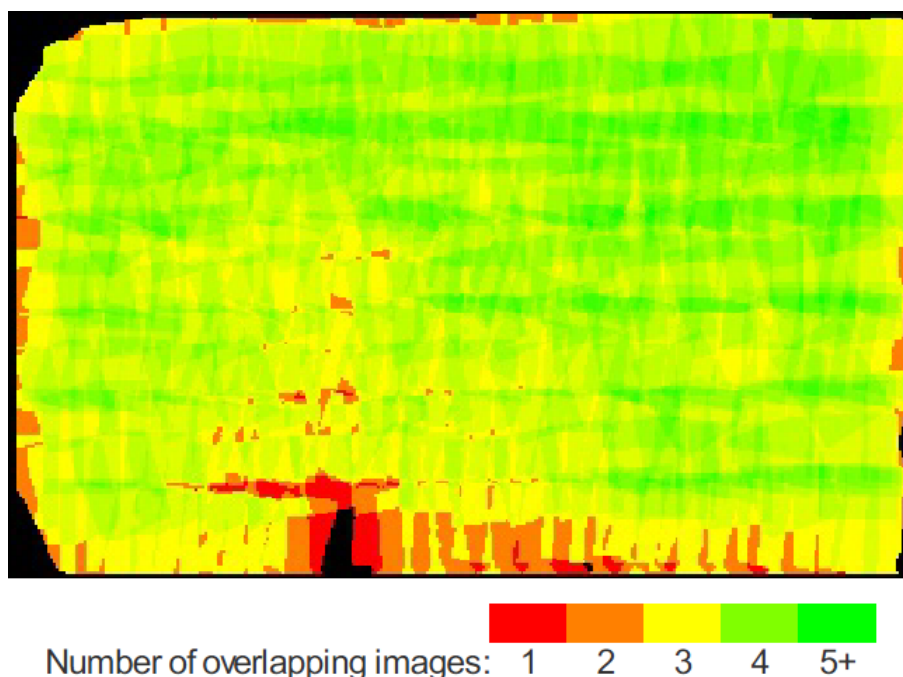


Figura 6.7: Extrato do relatório com as sobreposições entre fotografias calculadas para cada pixel do ortomosaico. Vermelho: fraca sobreposição entre imagens e forte probabilidade de ocorrerem maus resultados. Verde forte: Sobreposição ideal de 5 ou mais imagens.

se aumentou o n.º e distribuição de PFs, com especial incidência para localizações próximas da área problemática. Constata-se também que do processamento de 20 para 33 PFs, as diferenças não são significativas: ambos registam o mesmo erro de 9 cm e desvios muito semelhantes (veja-se tabela 6.2 e gráficos da figura 6.9).

## 6.4 Sumário e conclusões

Para a máquina fotográfica compacta comum que equipa o UAV, a ortofotografia apresenta uma qualidade radiométrica e de resolução espacial verdadeiramente excepcional. Por ser uma imagem digital desde a origem, não existem os problemas clássicos que por vezes ocorriam devido à revelação das películas fotográficas e à existência de sujidade nos *scanners*, que poderiam provocar manchas, pequenas lacunas e pouca nitidez na imagem ortofotográfica. Em sentido contrário nota-se a existência de muitos artefactos, cuja causa se deve ao facto de o MDS ser apenas constituído pela amostra primária de pontos cotados (e em muitos casos ausente nas coberturas do edificado, conforme vimos na análise realizada ao MDS), sem breaklines, beirados e cumeeiras vetorizadas, o que provoca a existência de estruturas mal dimensionadas, mal posicionadas e com visualização indesejada de fachadas. Para

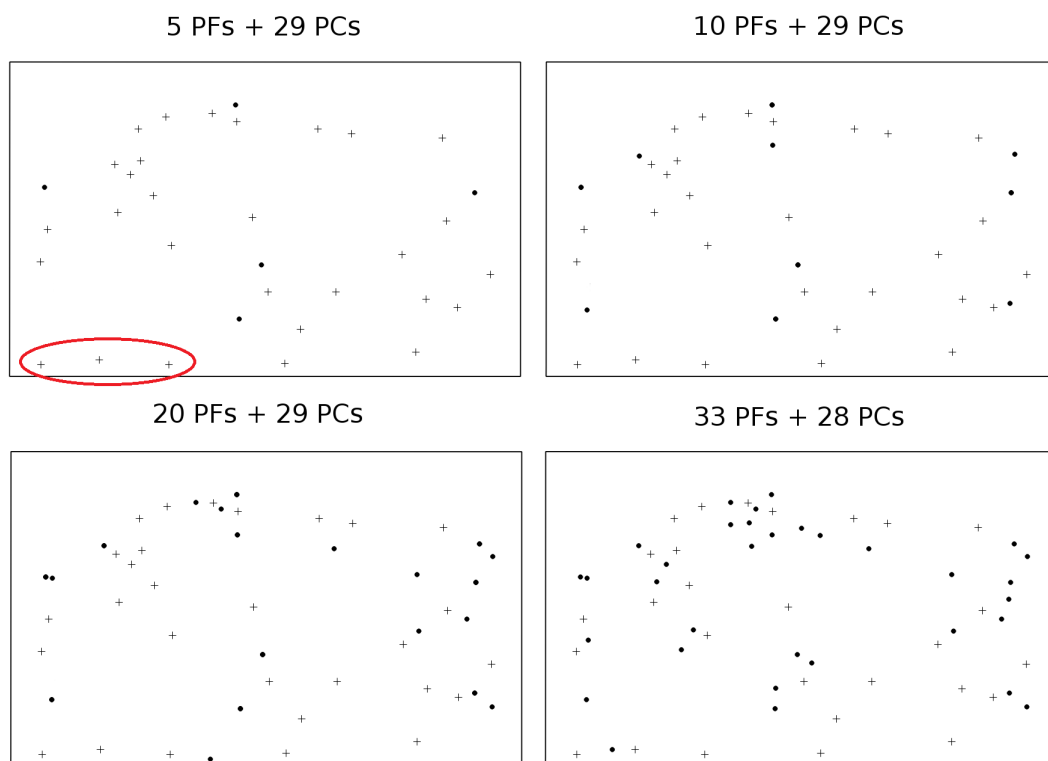


Figura 6.8: Disposição dos pontos de controlo (cruzes) e pontos fotogramétricos (pontos) pela ortofoto nos 4 processamentos realizados. A vermelho: pontos de controlo que registaram erros mais elevados.

esta constatação certamente contribuiu a baixa sobreposição entre imagens, com insuficientes perspetivas dos mesmos objetos. Acredita-se que uma maior sobreposição entre imagens, especialmente nas zonas com maior diversidade de tamanhos e formas de telhados e outros elementos elevados, se conseguisse uma cobertura mais uniforme de pontos cotados. Para se garantir a sobreposição desejada entre imagens em toda a área de estudo, é também importante que a área voada seja superior à área de interesse. Maior altura de voo (com conseqüente sacrifício da resolução espacial) e/ou fiadas cruzadas, são hipóteses a considerar. Quanto à qualidade posicional, constata-se que a disposição dos PFs é tão ou mais importante que o seu número e, mais uma vez, a sobreposição entre imagens joga aqui um papel decisivo. A qualidade temática está assim intimamente ligada à qualidade posicional. Toda a área de interesse deve estar dentro (ou não muito para fora) do polígono formado pelos PFs mais exteriores. Grandes extrapolações como as ocorridas no canto inferior esquerdo da área de estudo para o primeiro processamento (e processamento de 5 PFs), não deverão acontecer. A inclusão de mais alguns PFs, especialmente em zonas onde se preveja a ocorrência de mais artefactos, poderá ser desejável. A

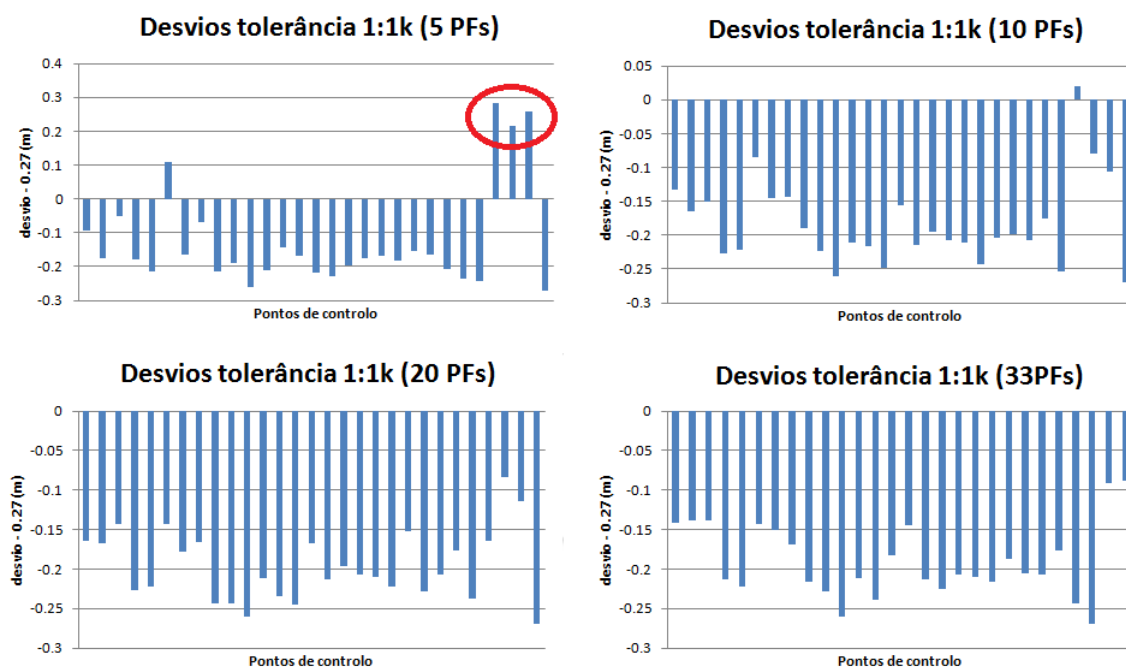


Figura 6.9: Desvios dos pontos de controle em relação ao desvio máximo admitido para a escala da carta 1:1000 para os 4 processamentos realizados. A vermelho: pontos de controle que registaram os maiores desvios.

utilização de uma estação total em áreas de edifícios altos e ruas estreitas em que o sinal GPS seja deficiente e com problemas de multitrajeto, é também recomendado.



## Capítulo 7

# Análise em ambiente de fotogrametria interativa

Para produzir ou atualizar a cartografia é necessário proceder à estereorrestituição dos elementos do terreno que constam do catálogo de objetos de qualquer modelo de dados cartográficos. A estereorrestituição realiza-se nos modelos ou pares estereoscópicos constituídos pela zona de sobreposição de 2 fotografias contíguas e devidamente orientadas interna e espacialmente, recorrendo a um software de fotogrametria interativa apetrechado com todos os recursos para a visualização e restituição a 3 dimensões. Visto que o software da Sensefly apenas realiza processamento automático, houve necessidade de testar esta tecnologia noutro ambiente fotogramétrico. O software escolhido foi o Photomod da empresa Racurs, na sua última versão (5.24), essencialmente porque tem uma distribuição “lite”, gratuita, que permite testar todas as funcionalidades do software num conjunto reduzido de fotografias do bloco (máximo de 40) e com óculos passivos do tipo anaglífico <sup>1</sup>.

Foi também realizado um pequeno teste numa estação fotogramétrica da Intergraph [13], com o software *ImageStation Automatic Triangulation* e com óculos ativos para visualização 3D <sup>2</sup>. Este software é próprio para processar voos clássicos, realizados por aviões tripulados.

Do resultado da ATA realizada pelo Postflight Terra 3D constavam todos os da-

---

<sup>1</sup>Os óculos anaglíficos são óculos em que cada uma das lentes é composta por um filtro de cor cromática complementar, tipicamente o vermelho e ciano. O córtex visual do cérebro ao receber cada uma das imagens num olho diferente (estando estas orientadas relativamente), funde-as numa só, dando a perceção de uma visualização estereoscópica a 3 dimensões.

<sup>2</sup>Os óculos ativos apresentam uma perceção estereoscópica de superior qualidade comparativamente aos sistemas passivos porque utilizam a imagem real. Dizem-se ativos porque estão sincronizados com a taxa de refrescamento do monitor, apresentando alternadamente e muito rapidamente cada uma das imagens, de tal forma que o córtex cerebral não se apercebe destas mudanças rápidas e funde as duas imagens numa só, conferindo desta forma a perceção de uma visão estereoscópica.



Figura 7.1: Sub-bloco escolhido da área do projeto, constituído por 38 fotografias dispostas em 3 fiadas.

dos necessários para colocar as fotografias num ambiente de fotogrametria interativa, nomeadamente os parâmetros de orientação interna e externa de todas as fotografias do bloco em estudo, juntamente com os parâmetros da distorção ótica da câmara usada durante o voo. Para além do mais, na versão mais recente do Postflight Terra 3D e caso se deseje, são produzidas fotografias isentas de distorções óticas, tal como se tivessem sido geradas por uma câmara métrica fotogramétrica ideal.

Este capítulo do nosso estudo teve por objetivo o estudo da qualidade posicional da triangulação aérea e da orientação absoluta dos modelos num ambiente de fotogrametria interativa.

## 7.1 Metodologia

Das 309 fotografias que fazem parte do bloco do projeto seleccionámos um sub-bloco para análise constituído por 38 fotografias (figura 7.1) e ocupando uma área aproximada de 11.4 hectares. Na escolha deste sub-bloco tivemos a preocupação de seleccionar uma área com a maior diversidade possível de ocupação do solo na área em estudo: terreno agrícola, terreno com edificado antigo e terreno com edificado de construção mais recente.

Visto que o software Postflight Terra 3D nos forneceu os parâmetros de orientação interna e externa, optámos primeiro por testar se seria possível, apenas com estes parâmetros, obtermos estereoscopia e qualidade posicional em ambiente Photomod, como seria expectável. Infelizmente a utilização direta destes parâmetros não nos permitiu formar modelos estereoscópicos e por isso optámos também por realizar alguns testes de aerotriangulação nesta plataforma, tomando sempre como parâmetros

de input os parâmetros de output mais exatos saídos do processamento realizado pelo Postflight Terra 3D. Em ambiente Photomod foram testados vários processamentos na tentativa de encontrar aquele que poderia oferecer melhores resultados. A maioria dos processamentos efetuados tiveram em consideração a metodologia proposta pela Racurs para o processamento de dados UAV [30] e foram os seguintes:

**Processamento 1:** Utilização direta dos dados de orientação interna e externa fornecidos pelo Postflight Terra 3D (disponível na opção *Orientation/Direct georeferencing*, do Photomod);

**Processamento 2:** Processamento tradicional para voos clássicos, com a utilização dos valores de orientação externa e interna fornecidos pelo Postflight Terra 3D, seguida de uma aerotriangulação automática com parâmetros para voos clássicos e intervenção manual em caso de número insuficiente de pontos homólogos. Por último foram medidos 6 pontos fotogramétricos, culminando o processo com um ajustamento final por feixes perspetivos;

**Processamento 3:** Processamento normal para voos UAV, com a utilização dos valores de orientação externa e interna fornecidos pelo Postflight Terra 3D, seguida de duas ATAs: uma primeira ATA mais grosseira (disponível na opção *Orientation/Automatic UAV triangulation*, do Photomod) e destinada especificamente a processamento de imagens UAV, seguida de outra ATA mais refinada, também com parâmetros de configuração específicos para processar este tipo de imagens. Houve um processo de escolha manual de pontos homólogos em caso de insuficiência. Por último foram medidos 6 pontos fotogramétricos, culminando o processo com um ajustamento final por feixes perspetivos;

**Processamento 4:** Processamento UAV proposto para fotografias de boa qualidade. Igual ao processamento 3 mas com 3 processamentos de ATA: o primeiro grosseiro; o 2º com parâmetros mais rigorosos e apenas realizado entre fotografias da mesma fiada; o 3º e último processamento realizado em todas as imagens do sub-bloco (imagens das mesma fiada e entre fiadas). Por último foram medidos 6 pontos fotogramétricos, culminando o processo com um ajustamento final por feixes perspetivos;

**Processamento 5:** Processamento igual ao processamento 3 mas com parâmetros de configuração da 2ª ATA mais rigorosos.

A tabela 7.1 resume os principais parâmetros de configuração da ATA para os processamentos testados (disponível na opção *Orientation/Automatic tie point me-*



Tabela 7.1: Principais parâmetros de configuração da ATA para os processamentos testados.

Proc.	Limiar de correlação [%]		Paralaxe vertical máxima [pixéis]		Erro máximo nos tripletos [pixéis]	
	Na fiada	Entre fiadas	Na fiada	Entre fiadas	Plano XY	Z
1	...	...	...	...	...	...
2	92	90	1.0	2.0	2.0	4.0
3	80	80	2.0	2.0	3.0	8.0
4	90	80	2.0	3.0	2.0	6.0
5	95	95	1.0	1.0	1.0	2.0



Figura 7.2: Localização dos pontos fotogramétricos (a vermelho) e dos pontos de controlo (a amarelo) na área aproximada do sub-bloco.

*asurement*). Para além da utilização de pontos fotogramétricos em todos os processamentos da nossa análise foram também utilizados pontos de controlo para aferir a qualidade posicional do processamento selecionado. As respetivas posições encontram-se descritas na figura 7.2.

Nos quatro últimos processamentos referidos, após a aquisição automática e interativa de pontos homólogos e PFs, reuníamos o conjunto necessário de pontos de ligação para a realização do ajustamento em bloco (figura 7.3), que teve por objetivo minimizar a soma do quadrado dos resíduos pesados destes pontos no espaço. Entretanto, alguns destes pontos foram excluídos após um primeiro ajustamento, por apresentarem resíduos demasiado elevados comparativamente aos resíduos dos restantes pontos.

Os principais parâmetros utilizados para os ajustamentos em bloco realizados, foram os seguintes:

- Precisão da medição manual/auto dos pontos na imagem [pixel]: 0.5;

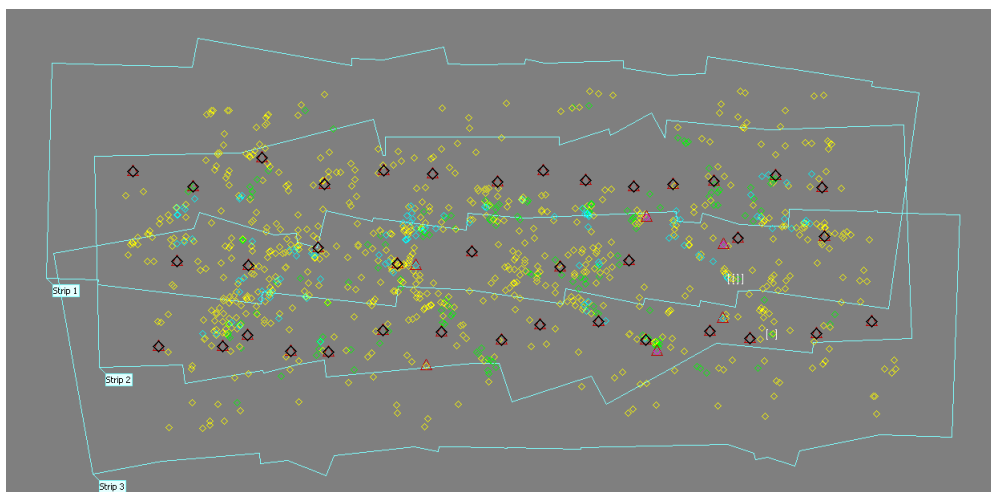


Figura 7.3: Distribuição típica dos pontos objeto dos processamentos em estudo. Legenda dos pontos: ver tabela 7.2.

Tabela 7.2: Legenda dos símbolos dos pontos objeto utilizados para o ajustamento do sub-bloco em estudo.

Símbolo	Designação
	PF e/ou ponto com coordenadas M,P,H;
	Ponto medido num par estereoscópico da mesma fiada;
	Ponto medido na zona de sobreposição de 3 ou mais imagens da mesma fiada;
	Ponto medido na zona de sobreposição de 2 ou mais imagens entre fiadas adjacentes;
	Centro de projeção da imagem;
	Ponto excluído.

- Peso das coordenadas dos pontos medidos nas imagens, PFs e centros de projeção: 1;
- Peso dos ângulos de orientação externos ( $\Omega$ ,  $\Phi$ ,  $\Kappa$ ): (1, 1, 1);
- Condição de paragem do ajustamento [m]: 0.5.

## 7.2 Resultados

Para comparar a qualidade posicional da triangulação de todos os processamentos efetuados, fomos analisar os respetivos resíduos dos pontos fotogramétricos e os valores de  $\sigma_0$ , após o ajustamento. O  $\sigma_0$  dá-nos uma indicação da qualidade do ajustamento global de cada processamento que utilizou como método

Tabela 7.3: Qualidade da aerotriangulação dos processamentos analisados, tendo em consideração os resíduos dos PFs e ajustamento global.

Proc.	Planimetria [m]			Altimetria [m]			$\hat{\sigma}_0^2$
	$ \Delta MP _{avg}$	EMQ	$\Delta MP_{max}$	$ \Delta H _{avg}$	EMQ	$ \Delta H _{max}$	
1	1.549	1.614	2.064	1.962	2.683	5.341	...
2	1.093	1.165	1.682	0.394	0.460	0.707	4.529
3	1.107	1.153	1.608	0.414	0.459	0.709	3.765
4	1.116	1.182	1.644	0.415	0.514	0.818	4.051
5	1.076	1.118	1.517	0.474	0.533	0.822	3.446

de ajustamento o ajustamento em bloco por feixes perspetivos. No caso de não existirem erros nas medições das observações e de as respetivas incertezas estarem corretamente definidas, então o valor de  $\sigma_0$  deve ser 1 (+- 30%) [29]. Aparentemente, da análise da fórmula utilizada pelo Photomod (ver apêndice, fórmula C.1), o  $\sigma_0$  corresponde à variância *a posteriori* do ajustamento realizado<sup>3</sup>.

Os resultados posicionais da aerotriangulação obtidos por cada processamento encontram-se descritos na tabela 7.3. Pela análise desta tabela podemos verificar que o processamento que obteve melhores resultados foi o número 5, em que se utilizaram parâmetros mais rigorosos de configuração da 2ª ATA. Este processamento foi o que obteve um menor EMQ planimétrico (1.118 metros) e um menor valor de  $\sigma_0$  (3.446), apesar de não registar o menor valor de EMQ altimétrico. Contudo não existe, aparentemente, uma diferença acentuada entre todos os processamentos, com exceção do número 1 relativo à georreferenciação direta. Este destaca-se claramente dos restantes pelos piores resultados alcançados. Apesar de tudo, o valor de  $\sigma_0$  obtido para o melhor processamento é superior ao valor máximo admitido, segundo o Photomod ( $\hat{\sigma}_{0max}^2 = 1.3$ ). Para sermos mais rigorosos, podemos realizar um teste da variância (no pressuposto de que as observações apresentam uma distribuição normal) para determinar se a variância *a priori* (ou variância da população) é compatível com a variância *a posteriori* (ou variância da amostra).

### Incógnitas

$$\begin{cases} N.^o \text{ de coordenadas objeto} = 946 \text{ pontos } 3D \times 3 \text{ coordenadas} = 2838 \\ N.^o \text{ de parâmetros de orientação externa} = 38 \text{ imagens} \times 6 \text{ parâmetros} = 228 \\ N.^o \text{ total de incógnitas}(n_0) = 3066 \end{cases}$$

<sup>3</sup>O Photomod usa a designação “ $\sigma_0^2$ ” para designar a variância *a posteriori* mas doravante e para evitar confusões com a variância *a priori*, usaremos a designação “ $\hat{\sigma}_0^2$ ” para este parâmetro.

### Observações

$$\begin{cases} N.^{\circ} \text{ de coordenadas imagem} = 2303 \text{ pontos imagem} \times 2 \text{ coordenadas} = 4606 \\ N.^{\circ} \text{ de coordenadas de PFs} = 6 \text{ PFs} \times 3 \text{ coordenadas} = 18 \\ N.^{\circ} \text{ de parâmetros de orientação externa} = 38 \text{ imagens} \times 6 \text{ parâmetros} = 228 \\ N.^{\circ} \text{ total de observações}(n) = 4852 \end{cases}$$

Desta forma o número de graus de liberdade( $df$ ), é dado por:

$$df = n - n_0 = 4852 - 3066 = 1786$$

Hipóteses do teste:

$$H_0 : \hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2 \text{ versus } H_1 : \hat{\sigma}_0^2 \neq \sigma_0^2$$

Sendo:

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_0^2 = 3.446 \\ \sigma_0^2 = 1 \end{cases}$$

É importante dizer-se que, de um modo geral, assume-se para a variância *a priori* o valor de 1 [20].

A variável do teste( $y$ ) é dada por:

$$y = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \cdot df \cap \chi_{0.05}^2(1786) \quad (7.1)$$

O intervalo de probabilidade(P) é:

$$P \left[ \chi_{0.025}^2(1786) < y < \chi_{0.975}^2(1786) \right] = 0.95 \quad (7.2)$$

Consultando uma tabela de qui-quadrado, vem que:

$$\chi_{0.025}^2(1786) = 1670.30$$

$$\chi_{0.975}^2(1786) = 1904.55$$

$$y = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \cdot df = \frac{3.4}{1} \cdot 1786 = 6072.4 >> 1904.55 \quad (7.3)$$

Logo, rejeita-se a hipótese nula ( $H_0$ ) e portanto a variância *a posteriori* não é compatível com a variância *a priori*. Consideramos pouco provável existirem erros nas medições dos pontos, caso contrário o ajustamento realizado pelo Postflight Terra 3D teria registado erros, o que não aconteceu e portanto o mais provável é que

Tabela 7.4: Erros máximos permitidos na fase de triangulação aérea. Diferença entre pontos da TA e pontos de verificação.

	Direção-Geral do Território			
	Escala da Carta			
	1:1k	1:2k	1:5k	1:10k
Desvio planimétrico [m] $\leq$	0.18	0.30	0.65	1.00
Desvio altimétrico [m] $\leq$	0.20	0.35	0.95	1.50

as incertezas das observações não tenham sido corretamente atribuídas. De facto, não alterámos as incertezas atribuídas por defeito pelo Photomod, acima de tudo por desconhecimento dos valores mais corretos. Parece-nos apesar de tudo correto comparar os valores dos diferentes processamentos entre si.

Como o processamento 5 foi aquele em que se obtiveram melhores resultados, utilizámo-lo nas fases seguintes de verificação da qualidade posicional.

A DGT estabelece critérios para o controlo da precisão e exatidão de todas as fases da produção cartográfica, incluindo a fase de triangulação aérea (tabela 7.4) [10]. Especificamente a DGT estabelece desvios máximos permitidos para a “diferença entre pontos da TA e pontos de verificação”. Considerando que os PFs utilizados são “pontos da TA” (visto que foram utilizados como tal) e também “pontos de verificação” (porque foram obtidos por métodos de grande precisão) e considerando que o “desvio planimétrico” e o “desvio altimétrico” se referem ao EMQ planimétrico e EMQ altimétrico, respetivamente, podemos assim comparar o EMQ dos resíduos dos PFs resultantes do ajustamento com os valores tabelados. Assim, comparando com as tolerâncias admitidas pela DGT, podemos verificar que o EMQ planimétrico de 1.118 metros obtido para o melhor processamento, não cumpre o critério do máximo de tolerância para a menor escala, enquanto que o resultado do EMQ altimétrico de 0.533 metros apenas cumpre o critério de tolerância previsto para a escala 1:5000 e escalas inferiores.

Para a qualidade posicional dos modelos utilizámos os 4 pontos de controlo, visíveis na figura 7.2 e que foram medidos no terreno por métodos de grande precisão. Depois de medidos estereoscopicamente, procedemos ao cálculo dos respetivos resíduos planimétricos e altimétricos, obtendo os resultados constantes na tabela 7.5.

Na tabela 7.5 o PC 66 não apresenta qualquer valor porque não se conseguiu visualizar o respetivo modelo em estereoscopia e, consequentemente, não foi possível medi-lo.

Comparando os valores calculados para os resíduos com os valores máximos permitidos pela DGT (tabela 7.6) [10], verificamos que em planimetria, com exceção do ponto 58, todos os valores dos resíduos estão acima do resíduo máximo permitido

Tabela 7.5: Resíduos da medição interativa dos pontos de controle (PC) nos modelos do melhor processamento.

PC	Resíduos Modelo	
	Planimetria	Altimetria
	[m]	[m]
124	1.430	0.320
66	...	...
58	0.734	0.358
13	1.391	0.149
<b>Média</b>	<b>1.185</b>	<b>0.276</b>

Tabela 7.6: Resíduos máximos permitidos pela DGT para a orientação absoluta dos modelos.

	Escala da Carta			
	1:1k	1:2k	1:5k	1:10k
Desvio máx. em planimetria [m] $\leq$	0.15	0.25	0.50	0.75
Desvio máx. em altimetria [m] $\leq$	0.18	0.30	0.75	1.30

Tabela 7.7: Qualidade da aerotriangulação do processamento número 6, tendo em consideração os resíduos dos PFs e ajustamento global.

Proc.	Planimetria [m]			Altimetria [m]			$\hat{\sigma}_0^2$
	$ \Delta MP _{avg}$	$EMQ$	$\Delta MP_{max}$	$ \Delta H _{avg}$	$EMQ$	$ \Delta H _{max}$	
6	1.124	1.158	1.436	0.114	0.139	0.194	1.424

para a menor escala. Por outro lado, o valor em altimetria mais elevado (ponto 58) é superior ao valor máximo permitido para a escala 1:2000 (0.30m) mas inferior ao valor máximo permitido para a escala 1:5000 (0.75m).

Com os elevados erros posicionais obtidos na fase da triangulação aérea e estereoscopia, o que naturalmente se prevê que aconteça nas fases seguintes (produção de pontos cotados, curvas de nível, MNA, orto e MNT) é que o erro aumente ou, na melhor das hipóteses, se mantenha, devendo de qualquer modo a qualidade posicional dos subprodutos referidos ficar fora das tolerâncias permitidas pela DGT.

Foi realizado ainda um último teste em ambiente de fotogrametria interativa Photomod (processamento 6) em que utilizámos como dados de base os mesmos dados do corrente projeto mas com parâmetros de orientação que se supõem mais exatos: Foram utilizados 33 PFs para o ajustamento realizado em ambiente Sensefly (mais do triplo do utilizado no projeto em discussão, que foi de 10 PFs) e fotografias corrigidas das distorções óticas. Nestas condições e utilizando exatamente a mesma metodologia descrita para o processamento número 5, obtiveram-se os resultados constantes na tabela 7.7.

Tabela 7.8: Resíduos da medição interativa dos pontos de controlo (PC) nos modelos do processamento número 6.

PC	Resíduos Modelo	
	Planimetria	Altimetria
	[m]	[m]
124	1.252	0.074
66	0.639	0.186
58	0.642	0.092
13	1.335	0.079
<b>Média</b>	<b>0.967</b>	<b>0.108</b>

Para este último processamento verifica-se que no caso da triangulação aérea não existem melhorias relativamente à planimetria, visto que o respetivo EMQ foi de 1.158 metros mas, no caso da altimetria verifica-se uma melhoria: passou-se de um EMQ de 0.533 metros verificado no 5º processamento para um EMQ de 0.139 metros, o que passa a cumprir neste caso o grau de exigência estipulado para a cartografia 1:1000 de 0.20 metros. Por outro lado verifica-se uma melhoria generalizada no caso da orientação absoluta dos modelos (tabela 7.8). Assim, em planimetria, o pior valor (PC 13) ultrapassa o valor máximo permitido para o desvio da escala 1:10000 (0.75 metros), enquanto em altimetria o pior valor (ponto 66), está dentro da tolerância permitida para a escala 1:2000 (0.30 metros). Conseguiu-se também neste projeto medir o PC 66 no par estereoscópico respetivo, algo que não tinha acontecido no 5º processamento.

Com resultados aparentemente tão negativos do Photomod, decidimos tentar compreender porque é que os resíduos encontrados foram tão elevados. Para isso, realizámos dois pequenos testes comparativos entre o Photomod e outros dois softwares:

- Um primeiro teste com o software da Sensefly, medindo na ortofotografia automaticamente produzida os pontos de controlo utilizados anteriormente para controlar os modelos estereoscópicos (neste caso a medição foi feita apenas em planimetria);
- Um segundo teste com um processamento realizado numa estação fotogramétrica clássica da Intergraph, que consistiu na realização de uma aerotriangulação análoga ao processamento 6 anteriormente referido, seguida da medição de pontos de controlo comuns em modelos comuns.

Da medição planimétrica dos pontos de controlo na ortofotografia, resultaram os valores expostos na tabela 7.9. Caso estes valores se tivessem verificado nos modelos

Tabela 7.9: Resíduos resultantes da medição interativa dos pontos de controlo (PC) na ortofotografia produzida pela Sensefly.

PC	Resíduos Orto
	Planimetria [m]
124	0.0790
66	0.0919
58	0.0578
13	0.0269
<b>Média</b>	<b>0.064</b>

estereoscópicos anteriormente descritos, poderíamos ter dito que o erro máximo encontrado (0.0919 metros para o PC 66), estava dentro da tolerância planimétrica permitida para a orientação absoluta dos modelos para a escala da carta 1:1000 (0.15 metros), o que não deixa de ser um resultado surpreendente porque a ortofotografia é um dos produtos finais do processo de produção cartográfica, prevendo-se que apresente erros senão superiores, pelo menos iguais às fases prévias da cadeia de produção, como é o caso da triangulação aérea.

O processamento realizado na estação fotogramétrica da Intergraph usou os mesmos dados de *input* do processamento número 6 anteriormente referido, *i.e.*, os dados de *output* do processamento realizado com 33 PFs na versão mais recente do Postflight Terra 3D e fotografias sem distorções óticas. Depois de criado o projeto neste ambiente, foi de seguida realizada uma ATA com um ajustamento por feixes perspetivos. Desta aerotriangulação resultou que 10 das 38 fotografias do sub-bloco em análise foram rejeitadas pelo software, porque não cumpriam aquilo que seria esperado de um voo clássico (demasiada distorção projetiva das imagens e demasiada sobreposição entre imagens, entre outras possíveis causas), já que o software da Intergraph que usámos foi concebido para processar voos de fotogrametria realizados por aviões tripulados, pesados e estáveis. Deste processamento resultou que foram encontrados automaticamente 994 pontos imagem em 28 fotografias. Para além desta informação, o relatório de triangulação aérea do software da Intergraph a que tivemos acesso, não nos forneceu os resíduos dos PFs resultantes do ajustamento, nem o mesmo sigma\_0, pelo que não pudemos comparar mais dados relativos à fase da triangulação aérea.

Comparando o número de pontos imagem entre os 3 softwares em estudo, verificámos que existia uma enorme diferença entre o Postflight Terra 3D, da Sensefly, e os restantes softwares (figura 7.4).

De seguida, procedemos à medição dos mesmos pontos de controlo nos mesmos



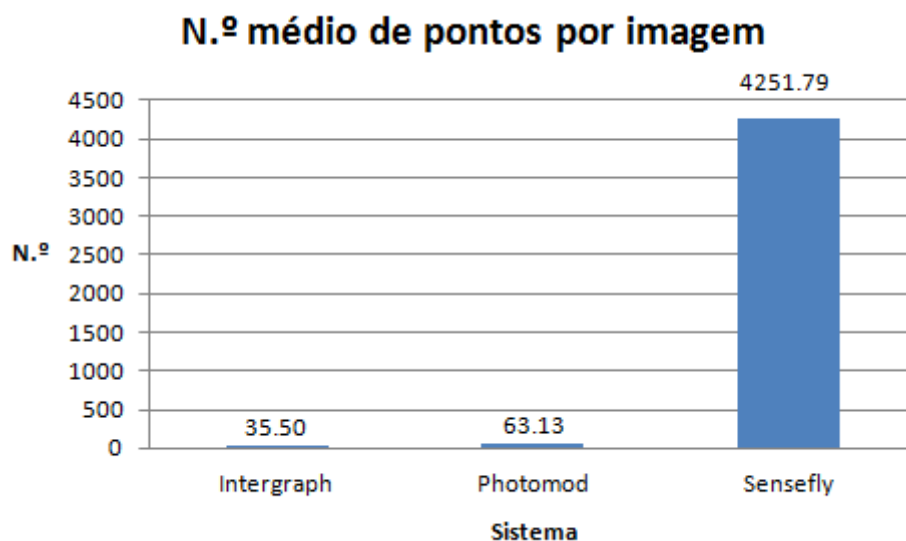


Figura 7.4: N.º médio de pontos por imagem nos três sistemas em estudo.

Tabela 7.10: Resíduos resultantes da medição interativa dos pontos de controlo (PC) nos mesmos modelos, em ambiente Intergraph e Photomod.

Modelo	PC	Planimetria		Altimetria	
		[m]		[m]	
		Intergraph	Photomod	Intergraph	Photomod
M450_451	93	0.0551	1.3322	0.0349	0.0919
M451_452	93	0.0164	1.3213	0.0980	0.0759
M450_451	13	0.0699	1.3281	0.0590	0.0780
M449_450	13	0.0330	1.3418	0.0430	0.0661
<b>Média</b>		<b>0.0436</b>	<b>1.3309</b>	<b>0.0587</b>	<b>0.0780</b>

modelos, tanto em ambiente Intergraph como em ambiente Photomod. Apesar de a medição dos pontos de controlo ter sido feita sem qualquer experiência prévia de fotogrametria neste ambiente (uso de óculos de visualização ativa, inexistência da função *snap to ground* do Photomod e com um rato próprio de fotogrametria), os resultados em planimetria foram surpreendentemente melhores do que no ambiente Photomod (tabela 7.10). Em altimetria, apesar de haver uma melhoria de 2 cm, esta não é tão significativa. Desta vez, os resultados obtidos em ambiente Intergraph estão perfeitamente dentro das tolerâncias exigidas pela DGT para a qualidade posicional dos modelos para a escala 1:1000, quer em altimetria quer também em planimetria.

## 7.3 Sumário e conclusões

Com estes resultados obtidos, a pergunta que se impôs foi a seguinte: Porque é que o software da Sensefly conseguiu realizar o ajustamento por feixes perspetivos com tão bons resultados (boa qualidade posicional da ortofotografia e processamento de todas as fotografias) e os restantes softwares não conseguiram? Para além do mais, o software da Sensefly partiu de uma situação inicial muito mais desfavorável do que os restantes softwares, porque as coordenadas iniciais dos centros de projeção das fotografias são as coordenadas iniciais tiradas pelo GPS do aparelho (que são coordenadas com erros da ordem de grandeza do metro) e porque nesta fase não existiam dados sobre a orientação das fotografias (*omega*, *phi* e *kappa*) mas apenas dados de orientação relativos ao sistema local de cada foto (*roll*, *pitch* e *heading*), com erros da ordem de grandeza do grau. Não foi o objetivo inicial deste trabalho proceder à realização de testes comparativos de software mas há um facto que se evidenciou e que foi a diferença entre este software e os restantes na quantidade de pontos homólogos utilizados para o ajustamento: Em média, o Postflight Terra 3D da Sensefly produziu 67 vezes mais pontos imagem do que o Photomod e 120 vezes mais do que a Intergraph. Se nos referirmos aos pontos objeto, esta diferença aumenta: em média o software da Sensefly produziu 74 vezes mais pontos objeto por imagem do que o Photomod e 138 vezes mais do que a Intergraph. Esta diferença verificada pode ficar a dever-se à utilização de diferentes abordagens para a extração de pontos de ligação em múltiplas imagens [35]: Uma das abordagens é utilizada por todos os softwares clássicos de fotogrametria e inclui uma pesquisa local realizada por algoritmos de correspondência de imagens ou ainda algoritmos de correspondência por mínimos quadrados. A outra abordagem mais moderna e na qual se baseia a metodologia da Sensefly, consiste na extração de pontos de interesse (ou pontos conspícuos) em cada imagem, independentemente, após o qual decorre um processo de procura de pontos de interesse homólogos em todas as imagens do bloco (para esta procura a Sensefly utiliza o algoritmo SIFT, já referido). Uma das características que diferencia os dois métodos está relacionada com a quantidade de pontos identificados, sendo muito elevada no segundo método e baixa no primeiro [35]. Poderá ser esta a explicação para as diferenças encontradas.

Apesar dos maus resultados dos diferentes processamentos de triangulação aérea realizados em ambiente Photomod, verificamos que, apesar de tudo, os resultados menos maus não foram aqueles que resultaram da metodologia proposta pela Racurs para processamento de dados UAVs mas sim os que tiveram critérios mais apertados para os parâmetros de configuração da ATA.

Apesar de a amostra que utilizámos para testar os modelos (4 modelos e 2 pontos

de controlo) não ter qualquer significado estatístico, os maus resultados obtidos nos modelos em ambiente Photomod estão coerentes com os maus resultados obtidos na triangulação aérea (especialmente em planimetria) e esta sim já se realizou com uma amostra significativa de fotografias (38 fotografias ao todo). De qualquer modo não é de excluir a hipótese de que uma parte dos maus resultados em ambiente Photomod se possam ficar a dever à utilização de equipamento não profissional (sistema com óculos anaglíficos e rato simples, com fraca desmultiplicação de movimentos).

Com amostras de reduzida dimensão e com pouco significado estatístico, a grande conclusão desta análise é de que é necessário realizar mais testes com equipamento de fotogrametria interativa profissional e com uma amostra robusta de pontos de controlo. No entanto, os bons resultados obtidos nos modelos em ambiente Intergraph (mesmo não sendo um ambiente próprio para processar dados UAV) abrem uma janela de esperança para a possibilidade de se recorrer a esta tecnologia para produzir e/ou atualizar cartografia com os parâmetros de qualidade posicional exigidos pela DGT.

## Capítulo 8

# Questionário a produtores de cartografia

Para além de tentarmos compreender o potencial tecnológico dos UAVs para atualização e produção de cartografia topográfica e temática, é importante também sabermos como é que o mercado nacional encara esta nova tecnologia. Para este efeito, propusemo-nos realizar um pequeno questionário a todos os produtores de cartografia registados na DGT. Pretendeu-se desta forma realizar um retrato do estado de conhecimento dos produtores de cartografia sobre a temática dos UAVs e averiguar também o grau de preparação do mercado para a exploração comercial desta tecnologia. Em concreto, as nossas perguntas de investigação foram as seguintes:

1. Qual o grau de conhecimento dos produtores de cartografia sobre esta tecnologia?
2. Já realizaram testes com UAVs?
3. Existem empresas a explorar comercialmente esta tecnologia?
4. Se sim, quais os produtos que comercializam?
5. Se não, pensam vir a explorar esta tecnologia num futuro próximo?
6. Quais as maiores dificuldades sentidas para a exploração comercial dos UAVs?

### 8.1 Metodologia

As questões que formulámos com vista a responder aos nossos objetivos, foram as seguintes:

1. Tem conhecimento de que os UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*) podem estar equipados com tecnologia a partir da qual é possível produzir cartografia e produtos derivados?

Esta pergunta é do tipo *sim/não* e pretendeu avaliar o conhecimento mais básico dos produtores sobre esta tecnologia, contribuindo para responder à pergunta 1 de investigação. Caso a resposta tivesse sido *não*, o questionário teria terminado aqui.

2. Considera que esta tecnologia pode substituir com sucesso os levantamentos aerofotogramétricos clássicos em áreas relativamente pequenas?

Pergunta do tipo *sim/não*, com possibilidade de justificar a opção escolhida. Esta questão pretende avaliar a perceção dos produtores sobre o potencial desta tecnologia, contribuindo também para responder à pergunta de investigação n.º 1.

3. Já realizou testes com UAVs ?

Pergunta do tipo *sim/não*, com possibilidade de justificar a opção escolhida e pretendendo responder à 2ª pergunta de investigação.

4. Se respondeu *Sim* à pergunta anterior, escolha a opção que mais se adequa:

- Já realizei testes e considero tecnicamente possível e economicamente viável;
- Já realizei testes e considero que não é tecnicamente possível nem economicamente viável;
- Nunca realizei testes mas considero tecnicamente possível e economicamente viável;
- Nunca realizei testes mas não considero tecnicamente possível nem economicamente viável.
- Outra situação. Qual?

Com esta questão, de opções mutuamente exclusivas, tenta-se também perceber se as conclusões dos testes realizados são fruto de um conhecimento empírico ou fruto de trabalho próprio.

Por lapso a 3ª e a 4ª alternativas não foram corretamente delineadas porque esta questão destinava-se apenas a quem já tinha realizado testes com UAVs.

5. A sua empresa explora comercialmente UAVs ?

Questão do tipo *sim/não* que pretende responder à pergunta 3 de investigação.

6. No caso de a resposta ser *sim* à pergunta anterior, pretendia-se saber qual ou quais os produtos comercializados com base em UAV, respondendo à pergunta n.º 4 de investigação. As opções de escolha, não mutuamente exclusivas, foram as seguintes:

- Fotografias áreas *true color*;
- Fotografias aéreas de infravermelhos;
- Imagens LIDAR;
- Modelo Digital de Elevação;
- Ortofotografia;
- Vetorização sobre ortofotografia;
- Cartografia segundo modelo numérico topográfico da DGT.
- Outro produto. Qual?

7. No caso de ter respondido *não* à pergunta 5: está a pensar vir a explorar as potencialidades dos UAVs num futuro próximo?

Com esta questão pretende-se responder à pergunta n.º 5 de investigação, tentando-se antecipar a evolução do mercado num curto/médio prazo.

8. Na sua opinião, quais os potenciais entraves à exploração comercial de UAVs?

Finalmente, com esta questão, pretende-se responder à pergunta n.º 6 de investigação, propondo-se um conjunto de opções, não mutuamente exclusivas:

- Preço de aquisição;
- Tecnologia pouco amadurecida;
- Falta de legislação adequada que enquadre a sua utilização;
- Pouco conhecimento sobre o assunto;
- Outro. Qual?

Através da aplicação *Google Forms*, produziu-se o questionário e enviou-se por correio eletrónico no dia 7 de Abril de 2014 para todos as entidades cuja declaração para o exercício de atividades de produção de cartografia topográfica ou temática de base topográfica estava aceite pela DGT àquela data [18].

### Tipo de empresa nas Finanças

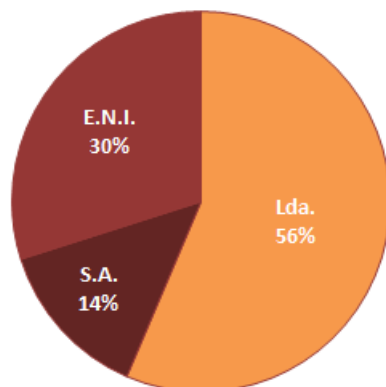


Figura 8.1: Tipo de entidade questionada perante as Finanças.

## 8.2 Resultados

O questionário foi enviado para 139 entidades, sendo a maioria constituída por sociedades comerciais (56%), mas também sociedades anónimas e empresários em nome individual (E.N.I.) (figura 8.1).

Dos 139 questionários enviados, recebemos apenas 17 respostas o que equivale a cerca de 12% do universo inquirido. Com uma amostra tão pequena não foi possível tirar quaisquer conclusões, pelo que foi feita apenas uma análise descritiva dos dados recebidos.

Analisámos as respostas, pergunta a pergunta:

1. Tem conhecimento de que os UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*) podem estar equipados com tecnologia a partir da qual é possível produzir cartografia e produtos derivados?

A esta pergunta e tal como se esperava, todas as entidades inquiridas responderam que sim.

2. Considera que esta tecnologia pode substituir com sucesso os levantamentos aerofotogramétricos clássicos em áreas relativamente pequenas?

94% dos inquiridos responderam que sim. Apenas um indivíduo respondeu que não, justificando que a *tecnologia ainda não dá garantia de precisões análogas às dos levantamentos aerofotogramétricos clássicos*. De salientar que esta entidade é uma das entidades que afirma já ter realizado testes com UAVs.

3. Já realizou testes com UAVs ?

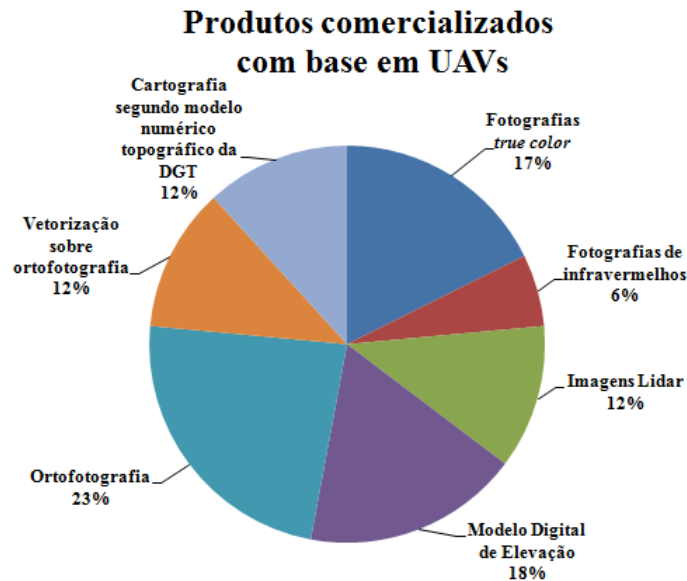


Figura 8.2: Produtos com base em UAVs, comercializados pelas empresas inquiridas que exploram esta tecnologia.

59% das entidades inquiridas responderam que não e 41% responderam que sim.

4. Se respondeu *Sim* à pergunta anterior, qual a opção que mais se adequa?

Todas as empresas que já realizaram testes com UAVs, consideraram tecnicamente possível e economicamente viável a utilização de UAVs para a realização de levantamentos aerofotogramétricos.

5. A sua empresa explora comercialmente UAVs ?

Quanto a esta questão, apenas 4 entidades (24% do total de respostas) admitem explorar comercialmente UAVs.

6. No caso de a resposta anterior ser *sim*, qual ou quais os produtos comercializados com base em UAV?

Conforme se pode ver pela figura 8.2, o produto que as empresas mais comercializam são as ortofotografias (23% do total de produtos comercializados), seguido do modelo digital de elevação(18%), dos trabalhos de edição e estereorrestituição (12%), a produção de imagens LIDAR(12%) e, finalmente, o produto menos comercializado são as imagens produzidas a partir de câmaras de infravermelhos(6%), sendo que neste capítulo, apenas uma das quatro empresas fornece este tipo de produto.



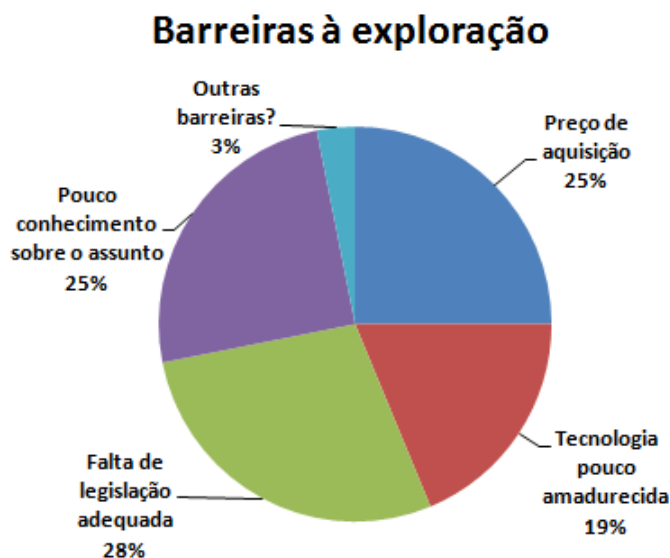


Figura 8.3: Maiores barreiras apontadas pelas empresas do estudo à utilização de UAVs com fins comerciais.

7. No caso de ter respondido *não* à pergunta 5: está a pensar vir a explorar as potencialidades dos UAVs num futuro próximo?

75% das empresas que responderam que não exploram comercialmente UAVs, ponderam vir a explorá-los num futuro próximo.

8. Na sua opinião, quais os potenciais entraves à exploração comercial de UAVs?

O maior entrave apontado pelas empresas (figura 8.3) foi a falta de legislação adequada que enquadre esta nova atividade (28% do total de dificuldades sentidas para a exploração comercial), seguida do pouco conhecimento que ainda existe sobre este assunto (25%) e o preço de aquisição (25%). A existência de outros entraves não disponíveis nas opções de escolha múltipla, foram também referidos por uma empresa, nomeadamente a *precisão para poder substituir levantamentos topográficos. Poder utilizar ex: laser scanning num UAV com toda a fiabilidade de posicionamento.*

### 8.3 Sumário e conclusões

Tal como seria de esperar, o universo das empresas inquiridas foram pequenas e médias empresas, a julgar pelo tipo de tributação perante as Finanças.

Por outro lado, a pequena amostra de respostas não foi representativa do universo das empresas e empresários produtores de cartografia topográfica existentes em Portugal, pelo que não pudemos fazer qualquer generalização. Arriscamos no

entanto a dizer, pelas respostas dadas, que a utilização de UAVs para produção de cartografia e produtos derivados não é um assunto indiferente à generalidade dos produtores de cartografia em Portugal: estes estão minimamente informados, havendo já inclusive empresas no mercado a explorar comercialmente esta tecnologia. O facto de as ortofotos serem o produto mais comercializado não é de estranhar porque são um produto com um elevado interesse visual, resultante (pelo menos no caso da tecnologia Sensefly que testámos) de um modo de produção totalmente automático, fazendo com que os custos associados sejam potencialmente menores do que outros produtos que requerem intervenção humana. Por último, a falta de legislação adequada é também uma realidade, não só em Portugal mas um pouco por todo o mundo, já que esta tecnologia evoluiu muito mais rapidamente do que a capacidade dos governos nacionais para legislarem sobre esta matéria.



# Capítulo 9

## Conclusões e perspetivas

### 9.1 Conclusões

Que seja do nosso conhecimento, o presente estudo é o primeiro em Portugal a testar a aplicabilidade da utilização de UAVs comerciais para a produção e atualização de cartografia municipal, com os parâmetros de qualidade exigidos pela DGT. Contudo, acabou por ser mais abrangente do que responder a esta questão: analisámos a preparação, o funcionamento e os produtos gerados por uma solução comercial de fotogrametria realizada a partir de UAVs; implantámos uma metodologia expedita de georreferenciação direta; comparámos diferentes métodos de interpolação de cotas a partir de uma nuvem de pontos coordenados; analisámos diferentes metodologias de aerotriangulação automática e diferentes softwares fotogramétricos comerciais e, finalmente, tentámos fazer um retrato do estado da arte ao nível dos produtores de cartografia existentes no nosso país. Começamos, no entanto, por tentar responder às nossas perguntas iniciais de investigação:

**Qualidade posicional do MDS?** Esta é uma pergunta para a qual não temos resposta porque não temos um termo de comparação ou, por outras palavras, a DGT, como autoridade nacional de cartografia em Portugal, não emitiu ainda, normas e parâmetros de qualidade para este produto. Pode por isso parecer que foi uma pergunta de investigação mal feita mas não a poderíamos deixar de fazer porque o MDS está na base da ortofotografia produzida e serviu-nos também para descobrirmos que coberturas e terraços elevados e/ou com alguma complexidade, não foram devidamente modelados, provavelmente devido ao facto de não ter havido um número suficiente de fotografias das superfícies dessas estruturas e lançámos por isso a hipótese de que, talvez, realizando um voo mais alto e/ou com fiadas cruzadas, se conseguisse modelar devidamente essas superfícies. Podemos no entanto afirmar, de uma forma indireta, que o MDS tem qualidade posicional pelos seguintes motivos:

primeiro, pela densidade de pontos cotados automaticamente gerados (22.3 pontos cotados /  $m^2$ ) e, segundo, o produto que resulta do MDS, a ortofotografia, tem uma excelente qualidade posicional ao nível do solo, como vimos. Para testarmos o MDS em superfícies elevadas, precisávamos de ter recolhido uma amostra muito maior de pontos de controlo nestas superfícies e afastadas de linhas de quebra, o que se revelou particularmente difícil, dada a estrutura de edificado complexo da zona em estudo.

**Qualidade posicional e temática da ortofotografia?** A ortofotografia analisada regista uma qualidade radiométrica e de resolução espacial, verdadeiramente excecionais. Ao nível posicional, cumpre os requisitos de qualidade exigidos pela DGT para a escala 1:2000 e mesmo 1:1000 desde que os PFs estejam bem dispostos pela área de interesse e que os pontos de controlo se encontrem também dispostos nesta área. O verdadeiro desafio regista-se ao nível geométrico: confirmámos a existência de muitos artefactos nas coberturas dos edifícios. Pela importância visual e métrica da ortofoto real, esta é uma ocorrência que deve ser minimizada. Uma vez mais, um MDS constituído por uma amostra primária e densa de pontos cotados que cubra também estas estruturas, pode ajudar a minimizar esta realidade. Contudo duvidamos que mais e melhor amostra primária de pontos cotados elimine totalmente a ocorrência de artefactos. Seria talvez por isso de considerar, pela Sensefly, a possibilidade de o MDS aceitar a inclusão de linhas de quebra, como beirados, cumeeiras e outras estruturas que registam grandes desníveis abruptos, devidamente vetorizadas a 3D. É preciso, no entanto, estarmos conscientes de que qualquer interação humana irá encarecer o produto final.

**Aplicabilidade à produção e atualização de cartografia municipal?** Os testes por nós realizados são promissores apesar de inconclusivos: é necessário testar outros softwares de fotogrametria que estejam preparados para processar imagens provenientes de voos de UAVs (projeção oblíqua, elevada sobreposição entre fotografias); é necessário realizar o controlo posicional num número significativo de modelos, obtendo precisões pelo menos tão boas como aquelas que obtivemos com a estação fotogramétrica da Intergraph; é necessário realizar um teste prático de estereorrestituição de elementos cartográficos, de preferência por um fotogrametrista experimentado; é necessário aferir a qualidade posicional da cartografia produzida e/ou atualizada desta forma; é necessário saber os custos associados aos trabalhos de estereorrestituição, visto que os modelos mais pequenos dos UAVs (comparativamente aos modelos de coberturas aerofotogramétricas clássicas) poderão exigir mais tempo para restituir os mesmos objetos. Não deixa no entanto de ser interessante saber que existem já empresas no mercado nacional que afirmam estarem aptas para

produzir e/ou atualizar cartografia segundo o modelo numérico topográfico da DGT e que certamente já terão realizados alguns destes testes que gostaríamos de ter realizado.

## 9.2 Perspetivas futuras

Os produtos clássicos de cartografia já não correspondem (ou correspondem pouco) às expectativas dos clientes. Hoje em dia os clientes querem uma cartografia feita à “medida”, facilmente atualizada e atualizável, querem ortofotografias com uma elevada qualidade radiométrica, elevada resolução espacial e poucos ou nenhuns artefactos e querem imagens realistas tridimensionais. Neste aspeto os UAVs e especialmente a classe dos micro UAVs, tem uma palavra a dizer: têm custos de operação muito reduzidos, comparativamente aos sistemas aerofotogramétricos clássicos; podem atuar muito rapidamente e em qualquer lugar; são completamente autónomos; são facilmente operados por qualquer pessoa. Por outro lado, os algoritmos de correlação de imagens estão num estado de desenvolvimento que prescindem da utilização de equipamento métrico especializado de fotografia e prescindem também de sistemas de posicionamento e orientação precisos (se bem que a utilização de um número mínimo de PFs é de todo recomendável). Por estes motivos, a fotogrametria realizada a partir de plataformas UAV é uma inevitabilidade e o mercado não vai deixar naturalmente de pressionar os produtores para integrarem esta tecnologia nos seus processos produtivos, as autoridades de cartografia para definirem parâmetros de qualidade para os novos produtos e, finalmente, os reguladores para legislarem, definindo quem pode voar, quando, como e em que condições. Temos também de distinguir entre utilizações que requerem pouca precisão (na ordem de grandeza dos metros) e utilizações que requerem precisões na ordem dos centímetros. O primeiro grupo pode ter interesse para as atividades da proteção civil e nomeadamente o acompanhamento e monitorização de incêndios florestais e cheias, com a produção rápida de ortofotos mais simples ou a captação de imagens de vídeo em tempo real. O segundo grupo e que temos debatido aqui, já exige um trabalho de pós-processamento e isso pode levar algumas horas senão mesmo dias até se obterem resultados (tudo depende do volume de imagens a processar e da capacidade de processamento do computador). Sem dúvida que um grande ponto fraco destes micro-sistemas é a sua fraca tolerância às condições atmosféricas e especialmente o vento.

Finalmente, é interessante saber que em países como a Suíça, a fotogrametria realizada a partir de UAVs faz provavelmente parte do programa das disciplinas

de fotogrametria dadas em instituições de ensino superior [11], tal é certamente o interesse e motivação que deverá suscitar entre os alunos.

# Bibliografia

- [1] Antunes, Carlos: *Apontamentos da disciplina de Introdução à Geodesia*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2012. IG10-GNSS.pdf.
- [2] *Areal Coordinates*. <http://mathworld.wolfram.com/ArealCoordinates.html>, (acedido em Maio de 2014).
- [3] Boucher, Claude e Zuheir Altamimi: *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. Relatório Técnico, École Nationale des Sciences Géographiques, May 2011.
- [4] Braun, Josef: *Aspects on True-Orthophoto Production*. In Fritsch, Dieter (editor): *Photogrammetrische Woche 2003*, páginas 205–214, Stuttgart, Deutschland, 2003. Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart. <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo03/braun.pdf>.
- [5] Bäumker, M. e F.J. Heimes: *New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System*. In *Proceedings of the OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation*, 2001.
- [6] *decreto-regulamentar n.º 10/2009 de 29 de Maio*.
- [7] *despacho 7186/2003 de 11 de Abril*.
- [8] Dinis, João: *Construção e Edição de Diagramas de Voronoi na Esfera*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Novembro 2013.
- [9] DSGC: *Coordenadas da Rede Geodésica Nacional (RGN) no sistema de referência PT-TM06/ETRS89*. Relatório Técnico, Direção-Geral do Território, Março 2012. RGN-PTTM06\_Mar12.xls.



- [10] DSRPC-DRF: *Exactidão e precisão posicionais para a cartografia em escalas grandes*. Relatório Técnico, Direção-Geral do Território, Novembro 2012. *Precoises\_para\_1k\_2k\_5k\_10k\_20121105.pdf*.
- [11] Eisenbeiss, Henri: *UAV Photogrammetry*. Tese de Doutoramento, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009.
- [12] IDW. [http://en.wikipedia.org/wiki/Inverse\\_distance\\_weighting](http://en.wikipedia.org/wiki/Inverse_distance_weighting), (acedido em Maio de 2014).
- [13] Intergraph. <http://www.intergraph.com>, (acedido a 27 de Junho de 2014).
- [14] Kong, Xiaoying, Eduardo Maio Nebot e Hugh Durrant-Whyte: *Development of a non-linear psi-angle model for large misalignment errors and its application in INS alignment and calibration*. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 1999.
- [15] Küng, Olivier, Christoph Strecha, Antoine Beyeler, Jean Christophe Zufferey, Dario Floreano, Pascal Fua e François Gervais: *The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-light UAV Imagery*. In *International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics UAV-g*, September 2011.
- [16] Legat, Klaus: *Approximate direct georeferencing in national coordinates*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60, páginas 239–255, March 2006.
- [17] Leica-Geosystems. <http://www.leica-geosystems.com>, (acedido a 27 de Junho de 2014).
- [18] Listagem Exercício de Cartografia. [http://www.igeo.pt/servicos/CGPR/exercicio\\_cartografia/listagem\\_exe\\_cartografia.asp](http://www.igeo.pt/servicos/CGPR/exercicio_cartografia/listagem_exe_cartografia.asp), (acedido a 6 de Abril de 2014).
- [19] Matlab. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>, (acedido a 27 de Junho de 2014).
- [20] Mendes, Virgílio: *Observações em Ciências Geográficas: Métodos de Ajustamento e Análise*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2012.
- [21] Mendes, Virgílio: *Sistemas de Posicionamento Global*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2012.

- [22] Meshlab. <http://meshlab.sourceforge.net/>, (acedido a 27 de Junho de 2014).
- [23] Navarro, Ana: *Prática de Elementos de Cartografia*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2010.
- [24] Nuske, Stephen, Michael Dille, Ben Grocholsky e Sanjiv Sing: *Representing Substantial Heading Uncertainty for Accurate Geolocation by Small UAVs*. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, August 2010.
- [25] Ortofoto. <http://en.wikipedia.org/wiki/Orthophoto>, (acedido em Maio de 2014).
- [26] Ortofoto Real. <http://aerometrex.com.au/blog/?p=765>, (acedido em Maio de 2014).
- [27] Perry, John Hendrix: *A Synthesized Directly Georeferenced Remote Sensing Technique for Small Unmanned Aerial Vehicles*. Tese de Mestrado, University of Florida, August 2009.
- [28] Ply. <http://www.cs.virginia.edu/~gfx/Courses/2001/Advanced.spring.01/plylib/Ply.txt>, (acedido a 18 de Abril de 2014).
- [29] Racurs: *Photomod User Guide - Block Adjustment*. Racurs Co., 2012. v5.24.
- [30] Racurs: *Photomod User Guide - Processing of UAV data*. Racurs Co., 2012. v5.24.
- [31] Redweik, Paula: *Fotogrametria Analítica*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2010.
- [32] Regra da mão direita. [http://en.wikipedia.org/wiki/Right-hand\\_rule](http://en.wikipedia.org/wiki/Right-hand_rule), (acedido a 28 de Junho de 2014).
- [33] Regulação, Acreditação e Homologação Centro para a: *Procedimento para os trabalhos de Fiscalização da Execução de Ortofotomapas e Cartografia Digital à Escala 1:2 000 - Especificações técnicas*. Relatório Técnico, Direção-Geral do Território, Abril 2004. 09\_CadernoEncargos\_2k\_fiscalizacao.docx.
- [34] Sensefly. <http://www.sensefly.com>, (acedido em Setembro de 2013).
- [35] Shragai, Ziv, Asaf Even-Paz e Itay Klein: *Automatic tie-point extraction using advanced approaches*. In *ASPRS 2011 Annual Conference*, May 2011.

- [36] Território, Direção Geral do: *Cartografia e ortofotocartografia à escala 1:2 000 - Normas técnicas de produção e reprodução*. Relatório Técnico, Direção-Geral do Território, Junho 2013.
- [37] Vallet, Julien, Flory Panissod, Christoph Strecha e M. Tracol: *Photogrammetric performance of an ultra light weight singlet UAV*. In *International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics UAV-g*, September 2011.
- [38] *Webtranscoord*. <http://cgpr.dgterritorio.pt/webtranscoord/>, (acedido a 18 de Abril de 2014).
- [39] Wolf, P. e B. Dewitt: *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. Mc-Graw Hill, Boston, MA, 3rd edição, 2000.
- [40] Zhao, Haitao, Bing Zhang, Changshan Wu, Zhengli Zuo e Zhengchao Chen: *Development of a Coordinate Transformation method for direct georeferencing in map projection frames*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 77, páginas 94–103, March 2013.

## Apêndice A

### Diferenças dos desvios do método do vizinho mais próximo (fase 1)

Tabela A.1: Diferenças entre o desvio do método do vizinho mais próximo e os desvios dos restantes métodos em análise (linear\_matlab e vizinhos naturais), para os pontos de controlo em que o método do vizinho mais próximo foi considerado o melhor método. Apenas se apresentam os pontos com desvios significativos, conforme tabela seguinte.

point_id	$\Delta_{\text{lin}} - \Delta_{\text{+prox}}$ [m]	$\Delta_{\text{nat\_out}} - \Delta_{\text{+prox}}$ [m]
13	0.931518	0.932887
69	0.306535	0.306144
89	0.454801	0.518588
91	0.462011	0.48172
104	0.113778	0.186223

Tabela A.2: Valores de sigma calculados (desvio padrão amostral).

Best		1sigma [m]	2sigma [m]	3sigma [m]
+prox	$\Delta_{\text{lin}} - \Delta_{\text{+prox}}$	0.170535	0.341071	0.511606
+prox	$\Delta_{\text{nat\_out}} - \Delta_{\text{+prox}}$	0.176414	0.352828	0.529242

## Apêndice B

### Diferenças dos desvios - todos os métodos (fase 2)

Tabela B.1: Diferenças entre todas as combinações dos desvios absolutos dos métodos analisados. Apenas se apresentam os pontos com desvios significativos, conforme tabela seguinte.

pid	Best	$\Delta_{idw-MTri}$ [m]	$\Delta_{idw-lin}$ [m]	$\Delta_{idw-nat\_o}$ [m]	$\Delta_{MTri-lin}$ [m]	$\Delta_{MTri-nat\_o}$ [m]	$\Delta_{lin\_o-nat\_o}$ [m]
9	nat_o	0.001444	0.001338	0.02188	0.000106	0.023324	0.023218
13	idw	0.136257	0.136257	0.137626	0	0.001369	0.001369
28	nat_o	0.032595	0.032595	0.09319	0	0.060595	0.060595
31	MTri	0.175371	0.072179	0.013414	0.24755	0.188785	0.058765
40	nat_o	0.028233	0.028233	0.041828	0	0.013595	0.013595
43	idw	0.003259	0.029222	0.035597	0.025963	0.032338	0.006375
46	nat_o	0.008218	0.020058	0.071625	0.028276	0.079843	0.051567
48	idw	0.051072	0.051072	0.045431	0	0.005641	0.005641
61	idw	0.034134	0.034134	0.030655	0	0.003479	0.003479
76	idw	0.044377	0.087406	0.03995	0.043029	0.004427	0.047456
77	linear	0.18263	0.209546	0.185846	0.026916	0.003216	0.0237
82	idw	0.043217	0.049246	0.0621	0.006029	0.018883	0.012854
96	MTri	0.514151	0.960651	0.66958	1.474802	1.183731	0.291071
113	linear	0.062835	0.079146	0.022472	0.016311	0.085307	0.101618
136	linear	0.043383	0.229521	0.206266	0.272904	0.249649	0.023255
140	idw	0.148043	0.148043	0.061635	0	0.086408	0.086408

Tabela B.2: Valores de sigma calculados (desvio padrão amostral).

Best	Diferença	1sigma [m]	2sigma [m]	3sigma [m]
Mtri	$\Delta_{idw-MTri}$	0.089746	0.179492	0.269238
MTri	$\Delta_{MTri-lin}$	0.250778	0.501555	0.752333
MTri	$\Delta_{MTri-nat\_o}$	0.200767	0.401533	0.6023
idw	$\Delta_{idw-MTri}$	0.032859	0.065718	0.098577
idw	$\Delta_{idw-lin}$	0.034301	0.068601	0.102902
idw	$\Delta_{idw-nat\_o}$	0.02655	0.0531	0.079651
linear	$\Delta_{idw-lin}$	0.083932	0.167864	0.251795
linear	$\Delta_{MTri-lin}$	0.086167	0.172335	0.258502
linear	$\Delta_{lin-nat\_o}$	0.032291	0.064582	0.096873
nat_o	$\Delta_{idw-nat\_o}$	0.028464	0.056929	0.085393
nat_o	$\Delta_{MTri-nat\_o}$	0.023672	0.047343	0.071015
nat_o	$\Delta_{lin-nat\_o}$	0.018908	0.037816	0.056724

## Apêndice C

### Fórmula de sigma\_0 usada pelo Photomod

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{N_t + N_g} \left[ \sum_{i=1}^{N_t} (A + B) + \sum_{i=1}^{N_g} (C + D + E) \right] \quad (\text{C.1})$$

Sendo:

$$\begin{cases} A = \left( \frac{\Delta x_i^{im}}{s_{x_i}^{im}} \right)^2 \\ B = \left( \frac{\Delta y_i^{im}}{s_{y_i}^{im}} \right)^2 \end{cases} \quad \begin{cases} C = \left( \frac{\Delta M_i^g}{s_{M_i}^g} \right)^2 \\ D = \left( \frac{\Delta P_i^g}{s_{P_i}^g} \right)^2 \\ E = \left( \frac{\Delta H_i^g}{s_{H_i}^g} \right)^2 \end{cases}$$

$\Delta x_i^{im}, \Delta y_i^{im}$  - Resíduos dos pontos imagem;

$\Delta M_i^g, \Delta P_i^g, \Delta H_i^g$  - Resíduos nos PFs e centros de projeção (GPS);

$s_x^{im}, s_y^{im}, s_M^{im}, s_P^{im}, s_H^{im}$  - Incerteza das observações;

$N_t$  - Número de pontos imagem;

$N_g$  - Número de PFs e centros de projeção.